



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

WISLA MILENA MORAIS DE OLIVEIRA

ANÁLISE DE FILTROS PLANARES SOBRE SUBSTRATOS TÊXTEIS

CARAÚBAS/RN
2018

WISLA MILENA MORAIS DE OLIVEIRA

ANÁLISE DE FILTROS PLANARES SOBRE SUBSTRATOS TÊXTEIS

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Campus Caraúbas, para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Praxedes da Silva Neto – UFERSA

CARAÚBAS/RN
2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

O48a Oliveira, Wisla Milena Moraes de.
Análise de Filtros Planares Sobre Substratos
Têxteis / Wisla Milena Moraes de Oliveira. -
2018.
60 f. : il.

Orientador: Valdemir Praxedes da Silva Neto.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2018.

1. Filtros Planares. 2. Substratos Têxteis .
3. Filtro Passa-Banda. 4. Filtro Rejeita-Banda.
I. Silva Neto, Valdemir Praxedes da , orient. II.
Título.

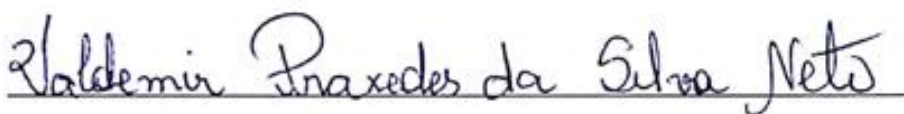
O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANÁLISE DE FILTROS PLANARES SOBRE SUBSTRATOS TÊXTEIS

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Campus Caraúbas, para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

APROVADO EM: 17/04/2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Valdemir Praxedes da Silva Neto - UFERSA

Orientador



Prof. Dr. Francisco de Assis de Brito Filho - UFERSA

Primeiro Membro



Prof. Me. Juan Rafael Filgueira Guerra - UFERSA

Segundo Membro

A minha mãe Girlene Maria de Morais e a todos
que me incentivaram e acreditaram em mim.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Quero iniciar agradecendo ao meu Deus, por sua graça, misericórdia e amor sobre mim derramados. Por ser refúgio e fortaleza nos momentos difíceis, e pela paz que me concedeu mesmo nos momentos incertos. Agradeço também pela vida das pessoas maravilhosas que Ele colocou na minha vida.

Quero agradecer a minha família, por todo apoio, incentivo e toda ajuda. Mais em especial, agradeço a minha mãe Girlene Maria, que sempre está comigo, compartilhando os momentos felizes, mais também os momentos difíceis, por ser amiga, e por todas as orações. Ao meu pai Cornélio de Oliveira Brito, pelo árduo esforço para me educar e por sempre acreditar em mim. Agradeço também a minha tia Girlenice Moraes que sempre esteve disposta a me ajudar e que contribuiu significativamente para que eu conseguisse dá esse primeiro passo na realização do meu sonho.

Grata sou também a Wyllamy Samuel, que muito me ajudou desde os primeiros passos do processo construtivo desse trabalho. A Pedro Moises que esteve comigo em toda a graduação, agradeço por toda ajuda, por todas as vezes que em meio a correria me acalmou e tornou tudo mais leve. Meu muitíssimo obrigado também a Gleidson Leite e Tyrone Gabriel, que foram essenciais para a realização desse trabalho, que contribuíram demasiadamente para que tudo desse certo e não mediram esforços em me ajudar. Obrigado também Beatriz Emilia, que sempre me ajudou quando eu precisei. Ao pastor Giueliton por todas as orações e disponibilidade. O meu muito obrigado também a Jose Cacio, por não medir esforços em me ajudar, quando precisei. A todos meu colegas que torceram por mim.

Aos meus professores, do ensino fundamental, médio e da graduação, por todo conhecimento repassado, por toda colaboração para a conquista desse diploma. Ao professor Juan Guerra, que se preocupou em me ajudar e sempre se disponibilizou. Ao meu orientador Valdemir Praxedes pela paciência, conhecimentos repassados, por todo incentivo e dedicação para que esse trabalho fosse realizado.

A todos que de alguma forma contribuíram e me ajudaram direta ou indiretamente, o meu Muito Obrigado.

“Mas os que confiam no Senhor recebem sempre novas forças. Voam nas alturas como águias, correm e não perdem as forças, andam e não se cansam.”

ISAÍAS (40-31)

RESUMO

O desenvolvimento de circuitos planares em materiais flexíveis tem sido uma área de pesquisa de grande interesse para os pesquisadores de telecomunicações da atualidade. Em vista disso, este trabalho apresenta uma análise sobre a aplicabilidade de materiais têxteis como substrato de circuitos planares de microfita. Para isso foram projetados e confeccionados um filtro passa-banda e um rejeita-banda. Estes, foram desenvolvidos para aplicações em sistemas *wireless* na banda Industrial Científica e Médica (ISM) e na banda de WiMax. Toda a análise foi realizada mediante um levantamento bibliográfico sobre o comportamento dessas estruturas, assim como por intermédio de simulações realizadas no *software Ansoft HFSS* da empresa *Ansys*. Os filtros foram construídos sobre um substrato têxtil constituído de fibras acrílicas, para posteriormente realizar-se os experimentos através do analisador de rede vetorial (VNA). Os resultados teóricos e medidos foram satisfatórios, sendo possível alcançar uma resposta em frequência desejada, mesmo, com a alta tangente de perdas e baixa permissividade dielétrica que o tecido utilizado possui.

Palavras-Chave: Filtros Planares; Materiais Flexíveis; Substrato Têxtil;

ABSTRACT

The development of planar circuits in flexible materials has been a field of research of great interest for telecommunications researchers. Therefore, this article presents an analysis on the applicability of textile materials as substrate of microstrip planar circuits. Thus, a band pass filter and a band reject were designed and made. These, were developed for applications in wireless systems in the Industrial Scientific and Medical band (ISM) and WiMax band. The whole analysis was carried out by means of a bibliographical survey on the behavior of these structures, as well as through simulations carried out in Ansoft HFSS software of Ansys Company. The filters were constructed on a textile substrate made of acrylic fibers, to later carry out the experiments through the vector network analyzer (VNA). The theoretical results and tested were satisfactory, being possible to reach a expected frequency response, even the high tangent of losses and low dielectric permissiveness that the tissue used has.

Key-words: Planar Filters; Flexible Materials; Textile Substrate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ilustração da Estrutura Física de uma Linha de Microfita.....	18
Figura 2- Disposição das Linhas de Campo em uma Linha de Microfita	18
Figura 3 - Ilustração de uma rede de duas portas	21
Figura 4- Representação da Matriz de Espalhamento em uma Rede de Duas Portas	23
Figura 5- Resposta em frequência de um filtro passa-baixa ideal	24
Figura 6 - Resposta em frequência de um filtro passa-alta ideal.....	25
Figura 7 - Resposta em frequência de um filtro passa-faixa ideal.....	25
Figura 8 - Resposta em frequência de um filtro rejeita- faixa ideal	26
Figura 9- Curva da resposta em amplitude de um Filtro Butterworth.	27
Figura 10 - Curva da resposta em amplitude de um Filtro Tchebychev	28
Figura 11 - Resposta de um filtro elíptico	29
Figura 12-Ressonadores: (a) Ressonador com $\lambda_{g0}/4$ em aberto; (b)) Ressonador com $\lambda_{g0}/4$ em aterrado; (c)) Ressonador com $\lambda_{g0}/2$; (d) Ressonador em anel; (e) Ressonador <i>patch</i> circular e (f) Ressonador <i>patch</i> triângulo.	30
Figura 13 – Ressonadores Planares: (a) <i>hairpin</i> ; (b) <i>hairpin</i> miniaturizado; (c) quadrado com <i>gaps</i> e (d) Linha com $\lambda/2$	31
Figura 14 – Circuito equivalente de ressonadores acoplados com acoplamento elétrico	32
Figura 15 - Circuito equivalente de ressonadores acoplados com acoplamento magnético	33
Figura 16 – Linhas acopladas em paralelo	34
Figura 17 – Ilustração da estrutura de um tecido plano.....	37
Figura 18 - Ilustração da estrutura de um tecido não tecido.....	37
Figura 19 – Ilustração da estrutura de um Tecido Malha	38
Figura 20 – Protótipo inicial do Filtro Passa-Faixa.....	43
Figura 21- Protótipo inicial do Filtro Rejeita-Faixa	45
Figura 22-Dimensões do Filtro em FR4	47
Figura 23 – Resultado da Simulação no HFSS do Filtro em FR4.....	48
Figura 24 – Resposta do Filtro Passa-Banda no Tecido Acrílico.....	49
Figura 25 – Parâmetros de Transmissão para o Filtro Passa-Faixa em FR-4 e em Substrato Têxtil	49
Figura 26 – Dimensões do Filtro Otimizado com RNA.....	50
Figura 27 – Resultado da simulação do Filtro Passa-Banda em Acrílico.	51
Figura 28 – Filtro Planar Construído.....	51

Figura 29 – Comparação dos parâmetros de transmissão e rejeição simulado e medido.....	52
Figura 30 – Dimensões do Filtro Rejeita – Faixa em FR4.	53
Figura 31 - Resultado da Simulação no HFSS do Filtro em FR4	54
Figura 32 - Resposta do Filtro Rejeita-Banda no Tecido de Acrílico	54
Figura 33- Parâmetros de Transmissão para o Filtro Rejeita-Faixa em FR-4 e em Substrato Têxtil.....	55
Figura 34 – Dimensões do Filtro Rejeita – Faixa Projetado.	55
Figura 35 - Resultado da simulação do Filtro Rejeita-Banda em Tecido Acrílico	56
Figura 36 – Protótipo Do Filtro Rejeita – Banda Construído Sobre O Substrato Têxtil.....	56
Figura 37- Resultados dos parâmetros de transmissão e rejeição simulado e medido	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características Elétricas do substrato FR4-Epoxi	47
Tabela 2 – Comparativo Entre Os Resultados Medidos E Simulados Para O Filtro Passa-Banda	53
Tabela 3- Comparativo Entre Os Resultados Medidos E Simulados Para O Filtro Rejeita-Faixa	57

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ω_c - Frequência de Corte

h - Espessura do substrato

L - Comprimento das linhas de sinal

W - Largura da linha de sinal

c - Velocidade da luz no espaço livre

Z_0 – Impedância característica da linha de transmissão

E – Campo Elétrico

H – Campo Magnético

$\tan\delta$ – Tangente de perdas

ϵ' – Constante dielétrica

ϵ'' – Fator de Perdas

ϵ_r – Permissividade elétrica relativa do material

ϵ_{ef} – Constante dielétrica efetiva

λ – Comprimento de onda

μ – permeabilidade magnética

σ – Condutividade do material

ω – Frequência angular

ISM – *Industrial Scientific and Medical* (Industrial Científica e Médica)

HFSS – *High Frequency Structural Simulator* (Simulador de Estruturas de Alta Frequência)

PAC - Poliacrilico

TEM – Transversal Eletromagnético

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1.	LINHAS DE TRANSMISSÃO PLANARES	17
2.2.	FILTROS PLANARES DE MICROFITA	20
2.3.	CARACTERIZAÇÃO DOS FILTROS.....	20
2.4.	MATRIZ DE ESPALHAMENTO	21
2.5.	TIPOS DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE FILTROS	23
2.5.1.	Filtros Passa-Baixa (<i>Low Pass</i>)	23
2.5.2.	Filtros Passa-Alta (<i>High Pass</i>)	24
2.5.3.	Filtros Passa-Faixa (<i>Band Pass</i>)	25
2.5.4.	Filtros Rejeita-Faixa (<i>Band Stop</i>)	26
2.6.	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	26
2.6.1.	Resposta Do Tipo Butterworth.....	27
2.6.2.	Resposta Do Tipo Tchebychev.....	28
2.6.3.	Resposta Do Tipo Elíptica.....	29
2.7.	RESSOADORES	30
2.8.	ACOPLAMENTOS.....	31
2.8.1.	Acoplamento Elétrico	32
2.8.2.	Acoplamento Magnético.....	33
2.8.3.	Acoplamento Misto	33
2.9.	FILTROS DE LINHAS ACOPLADAS	34
3.	SUBSTRATOS TÊXTEIS.....	36
3.1.	ESTRUTURAS TÊXTEIS	36
3.2.	FIBRAS TÊXTEIS	38
3.2.1.	Fibras Naturais	38
3.2.2.	Fibras Não Naturais	39
3.3.	FIBRA TÊXTIL UTILIZADA NA PESQUISA	39
4.	METODOLOGIA.....	41
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO TECIDO	41
4.2.	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL CONDUTOR	42
4.3.	SÍNTESE DOS FILTROS PLANARES	42

4.3.1. Filtro Passa-Banda.....	42
4.3.2. Filtro Rejeita-Banda.....	45
4.4. SIMULAÇÕES.....	46
4.5. FABRICAÇÃO E EXPERIMENTOS.....	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
5.1. FILTRO PASSA-BANDA	47
5.2. FILTRO REJEITA-FAIXA	53
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade a necessidade de comunicação está presente na vida do ser humano. A evolução da comunicação ocorreu simultaneamente a evolução do homem como ser social. Atualmente diversas tecnologias estão dispostas para suprir a necessidade da sociedade moderna de manter-se conectada, dentre elas pode-se citar telefones moveis, redes sem fio, satélites, TV e internet (ALVES, 2007).

No entanto, a busca por aperfeiçoamento nos sistemas de comunicação ainda é constante. Nos últimos anos o interesse das pesquisas tem se direcionado para o desenvolvimento de dispositivos mais leves, miniaturizados e com custo reduzido. Nesse contexto, as estruturas planares tem se mostrado uma boa solução (ALVES, 2007).

Nos componentes empregados nos sistemas de comunicação atual a utilização dos filtros é de suma importância. Segundo Zuluaga (2007) os filtros são componentes importantes em diversas áreas da engenharia elétrica, na área de telecomunicações sua importância está relacionada à o advento dos sistemas de comunicações sem fio, dado que, a seletividade de frequência passou a ser uma exigência.

Em razão de sua funcionalidade os filtros são uma parte essencial e frequentemente utilizada no projeto dos sistemas modernos de comunicação. Um entendimento amplo de muitos sistemas de comunicação só é possível com uma compreensão detalhada do funcionamento dos filtros (HASSAN,2015).

Em sistemas de comunicações sem fio os parâmetros fundamentais para um bom funcionamento do sistema de recepção são a sensibilidade, a banda passante e a rejeição de espúrios, desse modo, a utilização de filtros é indispensável. As estruturas planares são uma boa solução para filtros de entrada em sistemas inseridos em ambientes hostis, pois em virtude de serem uma estrutura passiva, problemas como aquecimento e radiação ultravioleta não afetam relativamente o seu desempenho (ARAÚJO, 2012).

O estudo dos filtros de microfita é baseado no conceito de linhas de transmissão planares. Estas podem ser descritas como dois condutores paralelos separados por um substrato dielétrico (SILVA NETO, 2013). Pesquisas recentes tem se concentrado na utilização de materiais flexíveis, tais como tecidos, para a fabricação dos substratos empregados na confecção dos circuitos planares de micro-ondas.

O desenvolvimento de circuitos planares de micro-ondas em substratos têxteis permite aplicações diversas, como por exemplo, a possibilidade de integrar circuitos planares de microfita em vestimentas militares, de modo, a facilitar e aperfeiçoar a comunicação, sem,

contudo, comprometer o conforto do usuário. Assim como, realizar aplicações em superfícies irregulares, onde os materiais rígidos que frequentemente são utilizados como substratos não podem ser empregados (CAVALCANTE, 2014).

Nos últimos anos o desenvolvimento das chamadas roupas inteligentes tem atraído pesquisadores das mais diversas áreas. Existem variadas aplicações para esse tipo de tecnologia, porém, o estudo tem se intensificado visando aplicações na área da biomédica, segurança pública e aplicações militares. Essa tecnologia aplicada a sistemas de comunicação sem fio possibilitará o desenvolvimento de sistemas vestíveis com bom desempenho e conforto para o usuário, inovando assim o processo de comunicação (MORO et al., 2015).

Esta pesquisa tem por finalidade analisar e desenvolver filtros planares de microfita que serão construídos sobre substrato têxtil. Desse modo, será abordado sobre os conceitos teóricos fundamentais para entendimento dos filtros de microfita, a metodologia utilizada para a sua construção e os resultados obtidos.

O objetivo geral será atingido realizando-se os seguintes objetivos específicos: determinar as características elétricas do tipo de tecido empregado como substrato; realizar cálculos teóricos para dimensionar a linha de microfita; através dos valores obtidos realizar a simulação do dispositivo mediante a utilização do software Ansoft HFSS; desenvolver e testar experimentalmente os filtros planares e comparar e analisar os resultados simulados e os obtidos experimentalmente.

Este trabalho está estruturado como descrito a seguir:

A segunda parte deste trabalho apresenta uma abordagem teórica básica para o entendimento dos filtros planares de microfita. Retratando sobre as linhas de transmissão planares, tipos de filtros, função de transferência, ressoadores, dentre outros princípios.

A seção seguinte ostenta em seu conteúdo, uma abordagem sobre os materiais flexíveis que atualmente são estudados para aplicação em circuitos planares. Expondo mais detalhadamente sobre os materiais têxteis.

A quarta seção descreve a metodologia empregada na pesquisa, mostrando como foram realizadas todas as análises, bem como o processo construtivo dos filtros planares sobre o substrato têxtil.

Subsequentemente será apresentado os resultados simulados no *software Ansoft HFSS*, as análises para cada uma das respostas em frequência e os filtros confeccionados sobre o substrato têxtil.

Por último, as considerações finais e perspectivas para trabalhos futuros são relatadas na sexta seção.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nessa seção serão apresentados os conceitos teóricos básicos que subsidiam o desenvolvimento dessa pesquisa. Deste modo, será abordado sobre as linhas de transmissão planares, conceitos teóricos fundamentais para o entendimento de filtros de microfita.

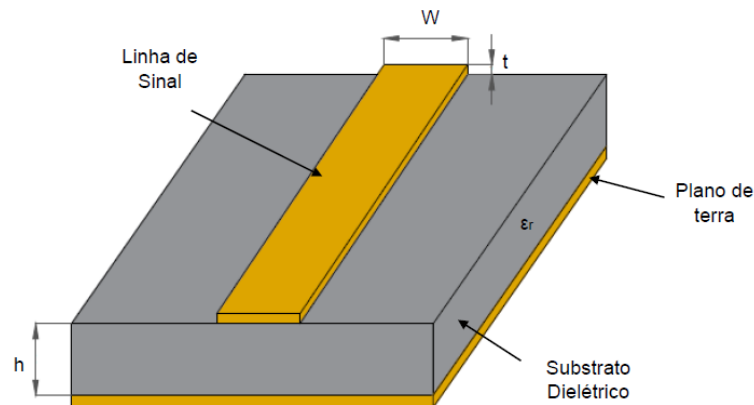
2.1. LINHAS DE TRANSMISSÃO PLANARES

No estudo da transmissão de dados e potência através da propagação de ondas eletromagnéticas, um importante conceito a ser abordado é o das linhas de transmissão. As Linhas de transmissão são utilizadas em telecomunicações para distribuição em altas frequências e podem ser definidas como dois ou mais condutores em paralelo utilizados para guiar a transmissão de sinais de comunicação de uma fonte geradora a uma carga (SADIKU, 2012). Cabo coaxial, linhas bifilares e linhas de transmissão planares são alguns exemplos de linhas de transmissão.

Para a construção de circuitos planares de micro-ondas emprega-se a utilização de linhas de transmissão planares. As micro-ondas são ondas eletromagnéticas correspondentes a uma faixa de frequência, no espectro eletromagnético, de 300 MHz a 300 GHz, sendo estas utilizadas em forno de micro-ondas, radares e em comunicações sem fio (WENTWORTH, 2009). Desse modo, o entendimento das linhas de transmissão planares é de grande importância no desenvolvimento de dispositivos aplicados a sistemas de comunicação móvel que operam na faixa de micro-ondas.

Existem três tipos básicos de linhas de transmissão planares: a linha de fita, guia de onda coplanar e a linha de microfita (WENTWORTH, 2009). De acordo com Sadiku (2012) a linha planar de microfita é a configuração mais utilizada para construção de circuitos de micro-ondas e em virtude de características como facilidade de construção e integração com outros dispositivos, esta será empregada para a construção do filtro planar proposto nesse trabalho. O layout básico de uma linha de microfita é mostrado abaixo.

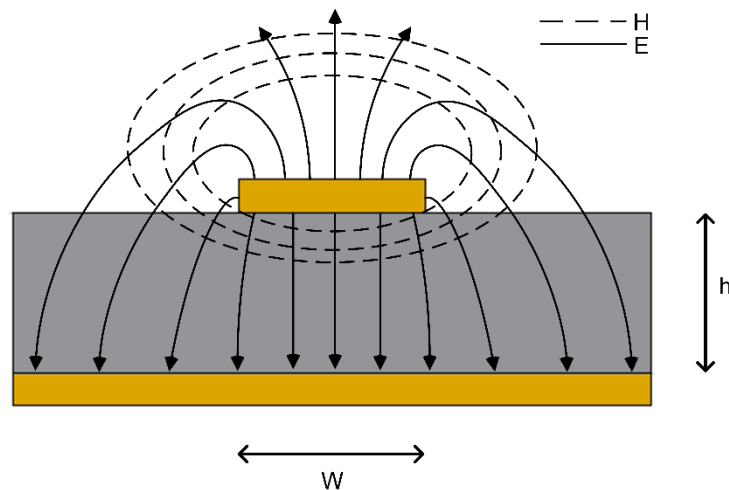
Figura 1- Ilustração da Estrutura Física de uma Linha de Microfita



Fonte: Autoria Própria (2018)

A linha de microfita consiste em uma linha de sinal de largura W e espessura t , disposta no topo de um substrato dielétrico de permissividade relativa ϵ_r e altura h , apoiados sobre um plano condutor. As linhas de campo elétrico e magnético estão confinadas principalmente no substrato dielétrico. No entanto, devido a estrutura aberta da linha de microfita o dielétrico é não-homogêneo, sendo constituído de uma composição ar/substrato dielétrico (ZULUAGA, 2007). A disposição das linhas de campo elétrico e magnético é exibida a seguir, ilustrando a dispersão das linhas de campo no ar:

Figura 2- Disposição das Linhas de Campo em uma Linha de Microfita



Fonte: Autoria Própria (2018)

Essa dispersão das linhas de campo no ar implica que a propagação não ocorre em um modo TEM puro, o que significa que existem componentes dos campos no sentido de propagação da onda. No entanto, por questões de simplificação, considera-se que a linha de

sinal esta imersa em um dielétrico contínuo de permissividade relativa efetiva ϵ_{ef} , e, portanto, a propagação é modelada a de um modo quase TEM (WENTWORTH, 2009). Essa aproximação pode ser considerada desde que a frequência de propagação não seja muito elevada, e pode ser aplicada na faixa de micro-ondas para até 10 GHz.

Outra aproximação que também pode ser considerada na faixa inferior de micro-ondas (1 GHz a 10 GHz), é desprezar a espessura t da linha de sinal. Essa aproximação não afeta de forma significativa os resultados, pois a espessura da fita condutora normalmente é muito pequena, aproximadamente $12\mu\text{m}$, e, portanto, essa simplificação pode ser realizada para facilitar a síntese e análise dos circuitos de micro-ondas. (MINERVINO, 2013). Na síntese de projetos com estruturas planares de microfita, algumas equações são importantes para se determinar a largura e o comprimento da linha microfita, assim como a equação da permissividade relativa efetiva. Estas serão apresentadas a seguir:

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \left\{ \frac{\left[\exp\left(\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 1}}{42,4}\right) - 1 \right] \left(7 + \frac{4}{\epsilon_r}\right) + \left(1 + \frac{1}{\epsilon_r}\right)}{11} + \frac{1}{0,81} \right\}^{\frac{1}{2}}}{\exp\left(\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 1}}{42,4}\right) - 1} \quad (1)$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} + 0,04 \left(1 - \frac{W}{h}\right)^2 \text{ para } \frac{W}{h} < 1 \quad (2)$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \text{ para } \frac{W}{h} > 1 \quad (3)$$

Na linha de microfita em virtude da propagação se dar entre dois meios, espaço livre e substrato dielétrico, a velocidade de propagação da onda eletromagnética não é função apenas da permeabilidade μ e permissividade ϵ do dielétrico, mais também, dos parâmetros físicos da fita condutora (ZULUAGA, 2007).

A impedância característica Z_0 em uma linha de microfita é influenciada pela largura da fita condutora, da altura e permissividade elétrica do dielétrico (WENTWORTH, 2009). Em uma linha de microfita a impedância distribuída possui um limite de valores práticos entre 20

Ω a 120Ω , sendo a impedância de 50Ω mais utilizada na prática. Para uma linha de sinal estreita a impedância característica possui valores mais elevados e para uma fita mais larga a impedância possui um valor inferior (SILVA NETO, 2017).

Essa é uma desvantagem da linha de microfita, pois a impedância está limitada entre uma faixa de valores, sendo que para valores elevados de impedância a largura da linha de sinal pode ser inadequada na prática. Além disso, a microfita não pode ser utilizada para propagar sinais de potência elevada. (SILVA NETO, 2013).

No entanto, características como peso e dimensões reduzidas, baixo custo, facilidade de construção e integração com outros dispositivos, são algumas propriedades fundamentais das linhas de transmissão planares, que demonstram o potencial dessa tecnologia. As linhas de microfita além de serem as mais utilizadas em circuitos integrados de micro-ondas, são empregadas como elementos de circuitos, tais como acopladores, antenas de microfita e filtros planares, (SADIKU, 2012).

2.2. FILTROS PLANARES DE MICROFITA

Na moderna comunicação sem fio os filtros desempenham um papel fundamental, sendo considerados um dos componentes indispensáveis em qualquer sistema de comunicação (SUSILA; RAO; PUSHPALATHA, 2017). Essa importância, deve-se à sua funcionalidade, pois os filtros são utilizados para filtrar um sinal, separando a frequência útil desse sinal, das frequências indesejáveis. A tecnologia de filtros planares desenvolvidos em linhas de microfita é uma das mais utilizadas na concepção de filtros de micro-ondas (SILVA NETO, 2013).

Dependendo das aplicações a serem realizadas, podem-se desenvolver filtros com elementos concentrados, indutores e capacitores, ou ainda projetar filtros a partir de elementos distribuídos tais como linhas de transmissão e *stubs*. Além dessas possibilidades, pode-se também desenvolver filtros com elementos ativos, ou com elementos passivos (MINERVIINO, 2013). Para aplicações em altas frequências, como a faixa de frequência de micro-ondas, são utilizados elementos distribuídos para o desenvolvimento de filtros planares.

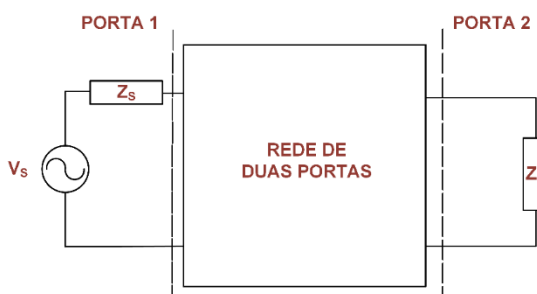
2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS FILTROS

Os filtros elétricos são utilizados em diversas aplicações e equipamentos de RF/micro-ondas. A construção destes dispositivos pode variar de acordo com a aplicação, contudo, a topologia de rede de circuitos é típica de todos. Em circuitos de RF/micro-ondas não é possível

medir diretamente tensão ou corrente, porém, é conceitualmente útil caracterizar esse tipo de rede em termos de impedância, tensão e corrente, para fazer uso dos conceitos de rede de baixa frequência (HONG; LANCASTER, 2001).

Os filtros planares são caracterizados como uma rede de duas portas. A representação desse tipo de circuito é ilustrada a seguir:

Figura 3 - Ilustração de uma rede de duas portas



Fonte: Autoria Própria (2018)

As relações entre tensão e corrente nos terminais da rede a caracterizam perfeitamente e dão origem as matrizes de impedância (Z), admitância (Y), transmissão (ABCD), híbrida (H) e a matriz de espalhamento (S). A escolha da matriz depende do problema que se quer resolver. Em geral, as matrizes de transmissão e espalhamento são utilizadas em circuitos de alta frequência, sendo a matriz de transmissão mais utilizada para caracterização de filtros em cascata, e a matriz de espalhamento para caracterização experimental do comportamento dos filtros (ROMANI, 2006).

A matriz de espalhamento ou simplesmente matriz $[S]$ além de caracterizar completamente uma rede de duas portas é de fácil compreensão e será descrita a seguir.

2.4. MATRIZ DE ESPALHAMENTO

Em redes de baixa frequência diversos parâmetros estão disponíveis para caracterização. Normalmente nesse tipo de rede são realizadas inúmeras medições nas portas com terminações em curto-circuito ou circuito-aberto. Todavia essas medições são de difícil realização em circuitos de altas frequências, como é o caso dos filtros de micro-ondas. Pois além de ser difícil obter essas terminações nas portas, a reflexão total de uma onda em tal terminação, em uma rede de alta frequência, pode danificar o dispositivo a ser testado (WENTWORTH, 2009).

Consoante Wentworth (2009), uma vez que é inadequado a utilização da terminação curto-circuito ou circuito-aberto em redes de altas frequências, utilizam-se os parâmetros de espalhamento ou parâmetros [S] para caracterizar esse tipo de rede, mediante a utilização de cargas casadas.

Os parâmetros de espalhamento ou parâmetros [S] fundamentam-se na análise das ondas incidentes e refletidas. Quando uma onda incide na porta uma parte é transmitida e outra refletida. A relação entre as ondas refletidas e incidentes levando-se em consideração os parâmetros de espalhamento é dada por:

$$V_1^- = S_{11}V_1^+ + S_{12}V_2^+ \quad (4)$$

$$V_2^- = S_{21}V_1^+ + S_{22}V_2^+ \quad (5)$$

Na forma matricial, essa relação pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ao se fazer o casamento de impedância em uma das portas é possível definir os parâmetros da outra. Por exemplo, casando a porta 2, tem-se que $V_2^+ = 0$. Assim:

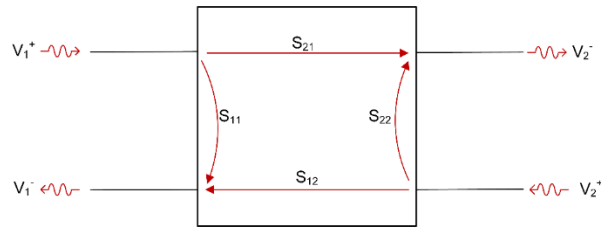
$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (7)$$

Sendo S_{11} a razão entre a onda refletida e onda incidente na porta 1, é definido como coeficiente de reflexão. Similarmente é possível determinar o parâmetro S_{21} :

$$S_{21} = \frac{V_2^-}{V_1^+} \quad (8)$$

Em que S_{21} indica o coeficiente de transmissão da onda que entra na porta 1 e sai na porta 2. O mesmo procedimento pode ser realizado fazendo o casamento na porta 1. Assim S_{11} e S_{22} representam os coeficientes de reflexão nas portas 1 e 2 respectivamente. E os parâmetros S_{21} e S_{12} indicam os coeficientes de transmissão entre as portas.

Figura 4- Representação da Matriz de Espalhamento em uma Rede de Duas Portas



Fonte: Autoria Própria (2018)

2.5. TIPOS DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE FILTROS

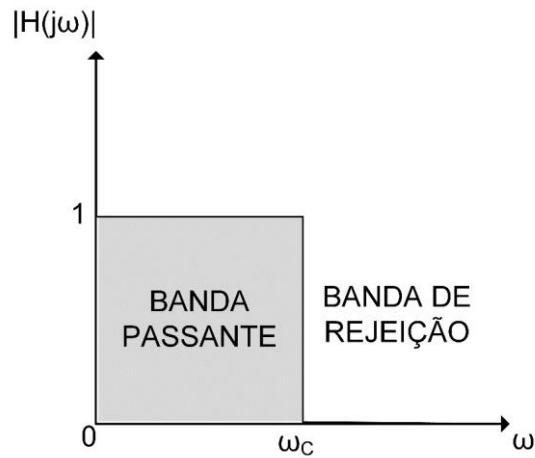
É possível definir um filtro de microfita, como uma rede de duas portas ou quadripolo utilizado para filtrar a transmissão de frequência de um sinal. Permitindo a passagem de frequência na banda passante do filtro e refletindo as frequências na banda de rejeição (CAVALCANTE, 2014). A partir do tipo de resposta em frequência, os filtros são classificados em quatro tipos: filtros passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa.

O comportamento ideal dessas categorias será apresentado a seguir. A resposta ideal leva em consideração uma perda de inserção nula na banda passante e uma atenuação infinita na banda de rejeição. Além disso, a transição da faixa de transmissão para a faixa de rejeição ocorre abruptamente.

2.5.1. Filtros Passa-Baixa (*Low Pass*)

Os filtros passa-baixa são circuitos que permitem a transmissão de frequências inferiores à sua frequência de corte e atenuam as frequências superiores a esse valor (MINERVIINO, 2013). Esse tipo de filtro com uma frequência de corte $\omega_c = 1$ e uma carga de impedância de 1Ω é utilizado como modelo para o desenvolvimento dos demais tipos de filtros, sendo então denominado de filtro protótipo (ZULUAGA, 2007). A seguir é ilustrado um gráfico que representa o comportamento ideal desse tipo de filtro.

Figura 5- Resposta em frequência de um filtro passa-baixa ideal



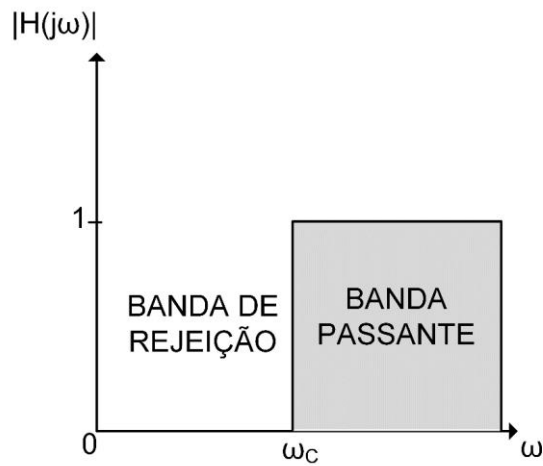
Fonte: Autoria Própria (2018)

A Figura 5 ilustra o comportamento ideal de um filtro passa baixa. Esse gráfico da amplitude exibe a variação de saída $|H(j\omega)|$, ou seja, o parâmetro de transmissão S_{21} , em função da frequência (ω). O parâmetro ω_c é definido como a frequência de corte, onde ocorre a transição da banda de transmissão para a banda atenuada. Como pode ser observado, na banda de passagem (quando a frequência é inferior a frequência de corte), a perda de inserção é nula. Valores acima dessa frequência são atenuados completamente.

2.5.2. Filtros Passa-Alta (*High Pass*)

O comportamento de um filtro passa-alta ideal é mostrado na Figura 6. Como pode ser observado o filtro passa-alta permite a passagem de frequência superiores a frequência de corte do filtro, frequências inferiores a esse valor são atenuadas. Esse tipo de filtro é muito utilizado para remover ruídos em redes elétricas, bem como em estúdios de mixagem, para equalização do sinal (MINERVIINO, 2013).

Figura 6 - Resposta em frequência de um filtro passa-alta ideal

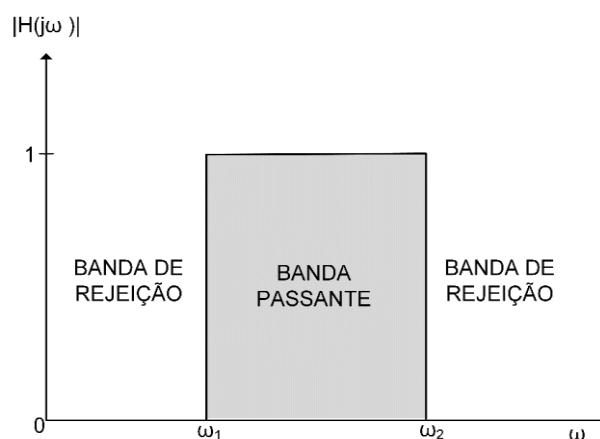


Fonte: Autoria Própria (2018)

2.5.3. Filtros Passa-Faixa (*Band Pass*)

Os filtros do tipo passa-faixa, ou passa-banda, são dispositivos que permitem a transmissão de determinadas faixas de frequência. Valores diferentes dessa faixa, sejam eles maiores ou menores, são atenuados pelo dispositivo. Esse tipo de filtro é muito utilizado para aplicações em telecomunicações e eletrônica (MINERVIINO, 2013). O comportamento ideal dessa categoria é apresentado na Figura 7:

Figura 7 - Resposta em frequência de um filtro passa-faixa ideal

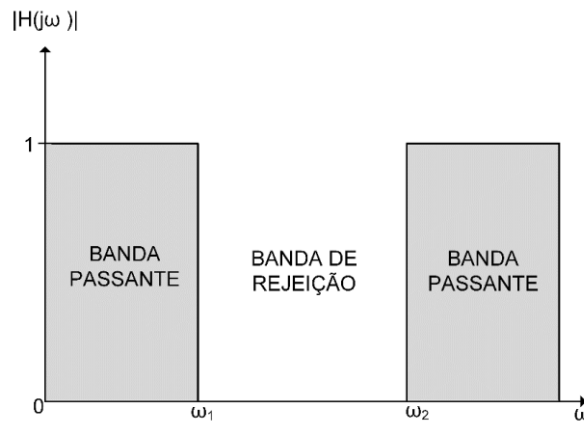


Fonte: Autoria Própria (2018)

2.5.4. Filtros Rejeita-Faixa (*Band Stop*)

Os filtros rejeita-faixa, ou rejeita-banda, atenuam uma determinada banda de frequência, e permitem a passagem das demais frequências do sinal, sejam elas superiores ou inferiores a essa banda de rejeição (SERRANO, 2007). O comportamento ideal desse tipo de resposta é mostrado na Figura 8:

Figura 8 - Resposta em frequência de um filtro rejeita- faixa ideal



Fonte: Autoria Própria (2018)

2.6. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

As respostas em frequência mostradas anteriormente foram baseadas no conceito de um filtro ideal, considerando uma perda de inserção nula na banda de passagem do filtro, bem como uma atenuação infinita na banda de rejeição. O filtro ideal não existe na prática, no entanto seu estudo serve como base para as aproximações das respostas desejadas para cada tipo de filtro (ROMANI, 2006).

O antagonismo existente entre a amplitude e a fase do filtro, faz necessário algumas aproximações das respostas para caracterização dos filtros. Essas aproximações podem ser em relação à fase ou a amplitude. No entanto as aproximações em amplitude são de maior interesse para os requisitos dos sistemas de comunicações (SILVA NETO, 2013).

Essas aproximações são realizadas a partir das funções de transferências. A função de transferência descreve a relação entre a saída e a entrada de um sinal. Para um filtro de duas portas a função de transferência é uma descrição matemática do parâmetro de transmissão da rede, isto é, o parâmetro S_{21} (HONG; LANCASTER, 2001). Segundo Silva Neto (2013) as

principais funções de transferência para a amplitude da resposta em frequência dos filtros são: Butterworth, Tchebychev e Elíptica. Sendo estas descritas a seguir.

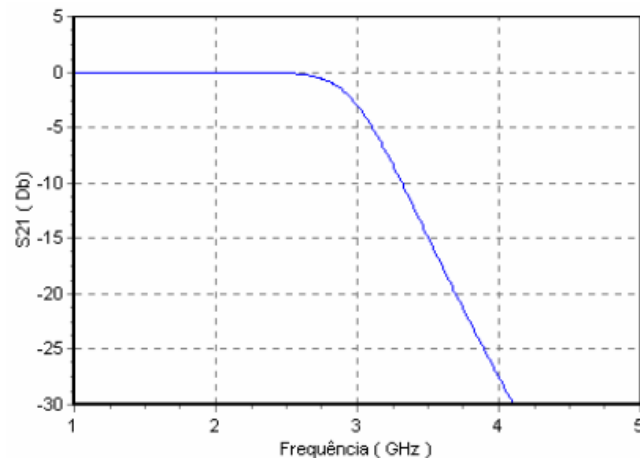
2.6.1. Resposta Do Tipo Butterworth

Os filtros Butterworth ou máxima planura são desenvolvidos de acordo com a função de transferência baseada no polinômio de Butterworth (ROMANI, 2006). A função de transferência para esse tipo de filtro é mostrada a seguir:

$$|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N}} \quad (9)$$

Em que ω_c é a frequência de corte do filtro e N é a ordem do filtro que corresponde ao número de elementos necessário para o protótipo do filtro. A curva da resposta em frequência desse tipo de filtro é mostrada na Figura 9:

Figura 9- Curva da resposta em amplitude de um Filtro Butterworth.



Fonte: Zuluaga (2007)

Esse tipo de filtro é o que mais se aproxima de um filtro passa baixa ideal quando ω se aproxima de zero. No entanto decai muito em qualidade ao se aproximar da frequência de corte ω_c (ZULUAGA, 2007). Ao aumentar a ordem N do filtro existe um aumento na atenuação. Desse modo, para obter uma atenuação mais próxima do ideal é necessário um filtro com ordem muito elevada (SILVA NETO, 2013).

2.6.2. Resposta Do Tipo Tchebychev

O polinômio de Tchebychev é uma aproximação mais tolerante ao longo de toda a banda passante do filtro, e não somente para frequências localizadas próximas a origem, como é o caso do polinômio Butterworth (ROMANI, 2006). Esse tipo de filtro apresenta ondulações na banda de transmissão, sendo a função de transferência desse tipo de resposta dada por:

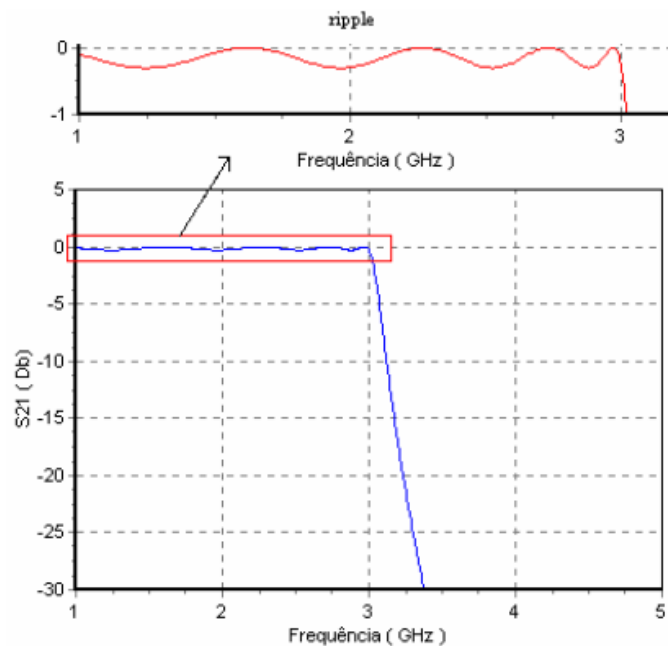
$$|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)} \quad (10)$$

Sendo ω_c a frequência de corte do filtro, ε a ondulação na faixa de transmissão e T_N o polinômio de Tchebychev que é definido como:

$$T_N(\omega) = \begin{cases} \cos\left(N \cos^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)\right), & \text{se } \omega < \omega_c \\ \cosh\left(N \cosh^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)\right), & \text{se } \omega \geq \omega_c \end{cases} \quad (11)$$

A resposta em frequência nesse tipo de filtro é exibida na Figura 10, sendo possível observar a ondulação (*ripple*) na banda passante:

Figura 10 - Curva da resposta em amplitude de um Filtro Tchebychev



Fonte: Zuluaga (2007)

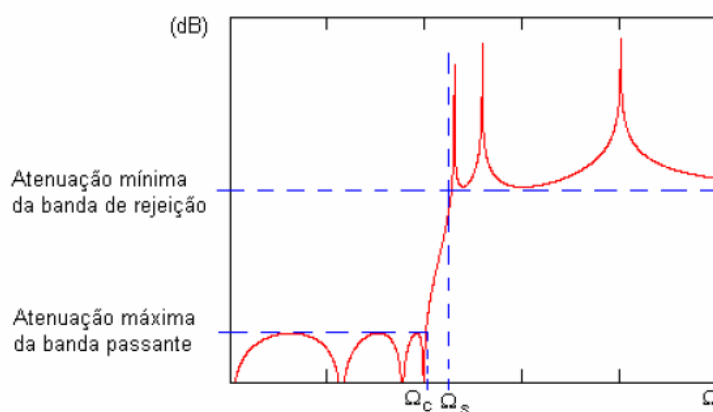
Um dos aspectos importantes desse tipo de resposta é o fato de ser possível controlar a ondulação na faixa de transmissão. Além deste, outro aspecto de muito interesse é a possibilidade de se obter um elevado grau de atenuação na banda de rejeição (SILVA NETO, 2013).

2.6.3. Resposta Do Tipo Elíptica

Em algumas aplicações práticas é necessário a utilização de filtros que apresentem uma faixa de transição mínima possível. Esse tipo de resposta é obtido utilizando um filtro com aproximação do tipo elíptica. No entanto, esse tipo de resposta apresenta um *ripple*, isto é, uma ondulação, tanto na banda passante quanto na banda de rejeição (ROMANI, 2006).

Conforme apresenta Silva Neto (2013) nesse tipo de aplicações que requerem respostas com nível mais acentuado de atenuação, as aproximações Butterworth e Chebyshev não são recomendáveis, visto que apresentam uma faixa de transição entre a banda de transmissão e banda de rejeição do filtro.

Figura 11 - Resposta de um filtro elíptico



Fonte: Romani (2006)

A Figura 11 exibe a curva de resposta de um filtro do tipo elíptico. Como pode ser observado existe uma ondulação tanto na banda passante, quanto na banda de rejeição. O parâmetro Ω_s representa a frequência onde se inicia as equi-ondulações na banda de rejeição (ROMANI, 2006)

A função de transferência desse tipo de resposta é exibida a seguir:

$$|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 C_N^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^N} \quad (12)$$

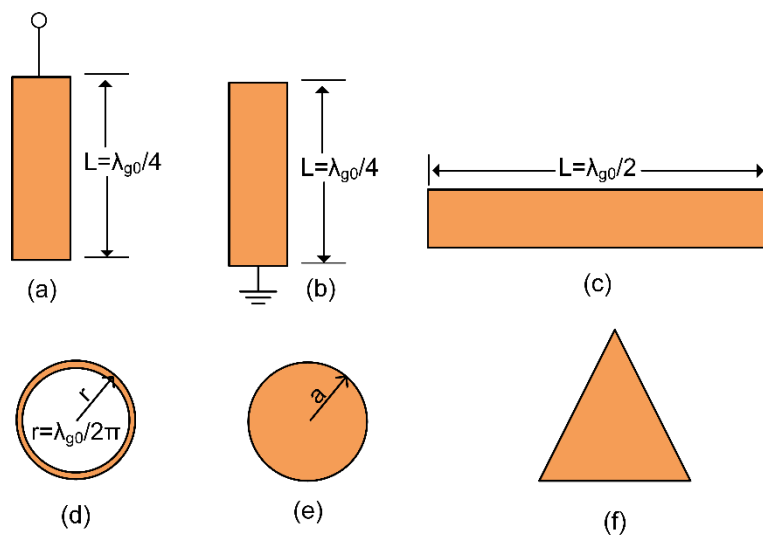
Em que ε corresponde a constante de ondulação na banda passante, N é a ordem do filtro e C_N representa as funções elípticas. Esse tipo de filtro apresenta alto grau seletividade e valores elevados de atenuação. No entanto, a síntese desse tipo de filtro é mais complicada (SILVA NETO, 2013).

2.7. RESSOADORES

Ressonadores são dispositivos que entram em ressonância em frequências bem específicas dependendo da tecnologia, geometria e materiais que os compõem (SERRANO, 2007). De acordo com Pozar (2012) os ressonadores de microondas são utilizados para diversas aplicações, tais como: filtros, osciladores, medidores de frequência e amplificadores.

Os ressonadores podem ser construídos a partir de diversas tecnologias, como ressonadores dielétricos, cavidades em guia de onda e ressonadores planares (SERRANO, 2007). Alguns exemplos de ressonadores do tipo planar que são empregados na construção de filtros são ilustrados na Figura 12:

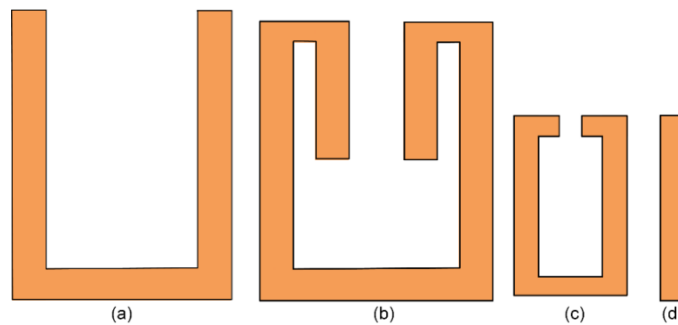
Figura 12-Ressonadores: (a) Ressonador com $\lambda_{g0}/4$ em aberto; (b)) Ressonador com $\lambda_{g0}/4$ em aterrado; (c)) Ressonador com $\lambda_{g0}/2$; (d) Ressonador em anel; (e) Ressonador *patch* circular e (f) Ressonador *patch* triângulo.



Fonte: Adaptado de HONG; LANCASTER (2001)

Objetivando a miniaturização dos filtros construídos a partir de linhas de transmissão, diversas geometrias foram desenvolvidas na construção de ressoadores, tomando como base as linhas com comprimento de $\lambda/4$. Esses modelos básicos de ressoadores são os *hairpin*, *hairpin* miniaturizado, quadrado com *gaps* e linha com $\lambda/2$ (ALVES, 2007). Esses modelos são ilustrados na Figura 13:

Figura 13 – Ressoadores Planares: (a) *hairpin*; (b) *hairpin* miniaturizado; (c) quadrado com *gaps* e (d) Linha com $\lambda/2$.



Fonte: Autoria Própria (2018)

Os ressoadores de *hairpin* foram escolhidos para prototipar os filtros desenvolvidos ao longo deste trabalho.

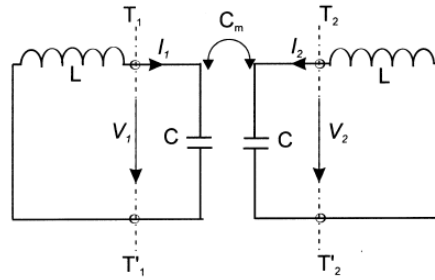
2.8. ACOPLAMENTOS

Os circuitos com ressoadores acoplados são importantes para o projeto de filtros RF/microondas, mais especificamente no desenvolvimento de filtros de banda passante estreita (HONG; LANCASTER, 2001). Segundo Alves (2007) os filtros podem ser construídos a partir de um conjunto de ressoadores acoplados.

2.8.1. Acoplamento Elétrico

O protótipo de um circuito com ressoadores acoplados eletricamente é exibido na Figura 14:

Figura 14 – Circuito equivalente de ressoadores acoplados com acoplamento elétrico



Fonte: HONG; LANCASTER (2001)

Neste circuito, conforme aborda Hong; Lancaster (2001), L representa a autoindutância, C a autocapacitância e C_m representa a capacitância mútua. Assim, a frequência angular de ressonância para um ressoador desacoplado é:

$$\omega_0 = LC^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Se a estrutura acoplada é um elemento distribuído, o circuito equivalente para o elemento agrupado é válido para frequências próximas a frequência de ressonância, ou seja, banda de frequência estreita (HONG; LANCASTER, 2001).

De acordo com Hong; Lancaster (2001), nesse tipo de acoplamento, a frequência de ressonância elétrica e magnética são dadas, respectivamente por:

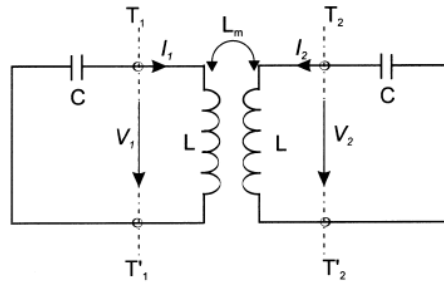
$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + C_m)}} \quad (14)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C - C_m)}} \quad (15)$$

2.8.2. Acoplamento Magnético

O circuito ilustrado na Figura 15 é um modelo equivalente de estruturas com ressoadores acoplados magneticamente:

Figura 15 - Circuito equivalente de ressoadores acoplados com acoplamento magnético



Fonte: (Hong; Lancaster (2001))

Similarmente ao acoplamento elétrico, L e C representam autoindutância e autocapacitância e L_m é a indutância mútua. As frequências elétricas e magnéticas apresentadas por Hong; Lancaster (2001), são:

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{C(L - L_m)}} \quad (16)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{C(L + L_m)}} \quad (17)$$

2.8.3. Acoplamento Misto

Nesse tipo de acoplamento, ocorre tanto o acoplamento elétrico quanto o magnético, entre os ressoadores e não existe predominância de nenhum tipo de acoplamento, as equações para as frequências de ressonância mostradas por Hong; Lancaster (2001), são:

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C - C_m)(L - L_m)}} \quad (18)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C + C_m)(L + L_m)}} \quad (19)$$

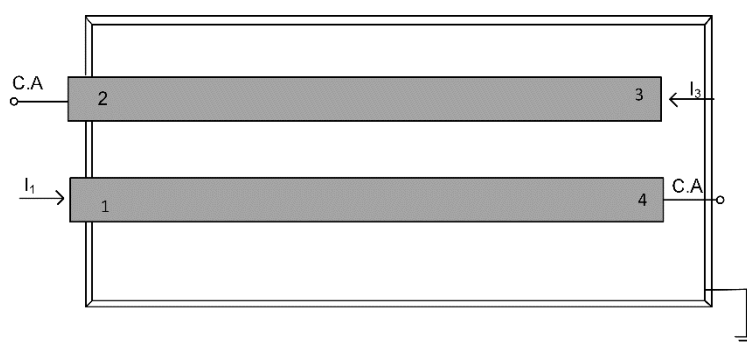
O estudo de acoplamentos em circuitos de micro-ondas foi desenvolvido, em decorrência de um dos filtros analisados estar baseada no uso de ressoadores de linhas de microfita acopladas.

2.9. FILTROS DE LINHAS ACOPLADAS

Quando duas linhas são colocadas próximas entre si a interação entre as ondas EM produzem um acoplamento. Essas linhas denominadas linhas acopladas, são constituídas por três ou mais condutores colocados estreitamente aproximados entre si (HASSAN,2015). Comumente os filtros de microfita são fabricados com seções de linhas de transmissão associadas em série, paralelo ou em cascata, bem como mediante a utilização de *stubs* em curto ou em circuito aberto. Esses filtros são muito aplicados em sistemas de comunicação que operam na faixa de micro-ondas, tais como Wi-Fi, WiMax e Bluetooth (MINERVIINO, 2013).

Linhas de transmissão acopladas em paralelo podem ser utilizadas para o desenvolvimento de muitos tipos de filtros. Em geral, essa topologia é fácil de ser empregada para desenvolvimento de filtros em microfita com uma largura de banda estreita, pois filtros com banda larga requerem linhas estritamente acopladas, sendo estas, difíceis de serem fabricadas. Uma rede de duas portas pode ser formada com duas das quatro portas terminadas em curto-circuito, circuito aberto ou ainda se conectando os dois terminais. (POZAR, 2012).

Figura 16 – Linhas acopladas em paralelo



Fonte: Autoria Própria (2018)

Além dessa possibilidade, um filtro também pode ser feito utilizando seções de linhas acopladas em cascata. Essa topologia consiste em N seções de linhas de transmissão em cascata, com impedâncias distintas, organizadas alternadamente entre uma linha com impedância elevada e outra com baixa impedância (SILVA NETO, 2013).

A escolha da geometria depende da aplicação, contudo, elas podem ser encontradas em dispositivos portáteis, TV digital, sistemas de radar e telemetria, transmissores e receptores de micro-ondas para sistemas de comunicação, dentre outras aplicações (MINERVIINO, 2013).

3. SUBSTRATOS TÊXTEIS

No setor de telecomunicações a busca por dispositivos cada vez mais leves, compactos, flexíveis e com baixo custo é constante. Nos últimos anos, uma nova linha de pesquisa tem se concentrado no estudo e desenvolvimento de substratos têxteis empregados na construção de circuitos planares. A utilização de substratos têxteis possibilitará aplicações que antes eram impossíveis em virtude da rigidez dos substratos que geralmente são utilizados (CAVALCANTE, 2014).

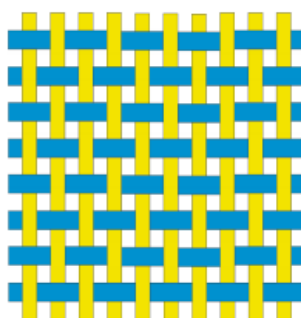
De acordo com Cavalcante (2014) existe um grande interesse no estudo de novos materiais tais como cerâmicas, blendas, compósitos, polímeros, tecidos, dentre outros. Sendo utilizado substratos têxteis no desenvolvimento do filtro planar proposto nesse trabalho, a seguir será abordado sobre os materiais têxteis.

3.1. ESTRUTURAS TÊXTEIS

Um tecido pode ser definido como um material constituído a partir de fios de fibras naturais, sintéticas ou artificiais, que compostos de diversas maneiras formam roupas e outros tipos de vestimentas (PEREIRA, 2009). A confecção de uma estrutura têxtil ocorre inicialmente com a obtenção das fibras, posteriormente estas são submetidas ao processo de fiação, onde os fios são fabricados com as características desejadas. Em seguida os fios são entrelaçados formando a estrutura têxtil. Os tecidos podem ser classificados em tecido plano, tecido não-tecido ou tecido malha (HOLANDA, 2016).

O tecido plano é formado pelo entrelaçamento de conjuntos de fios que se cruzam perpendicularmente. Os fios na direção longitudinal, isto é, no comprimento do tecido, são denominados urdume e os fios na direção transversal, na largura do tecido, são denominados trama (PEREIRA, 2009). A figura 17 esboça essa estrutura:

Figura 17 – Ilustração da estrutura de um tecido plano



Fonte: PEREIRA (2009)

As estruturas de Tecidos Não Tecidos (TNT) não passam pelo processo de tecelagem ou malharia, sendo constituídas principalmente por estruturas fibrosas flexíveis, porosas e dispostas direccionalmente ou ao acaso (GUERRA, 2016). A Figura 18 apresenta a ilustração desse arranjo:

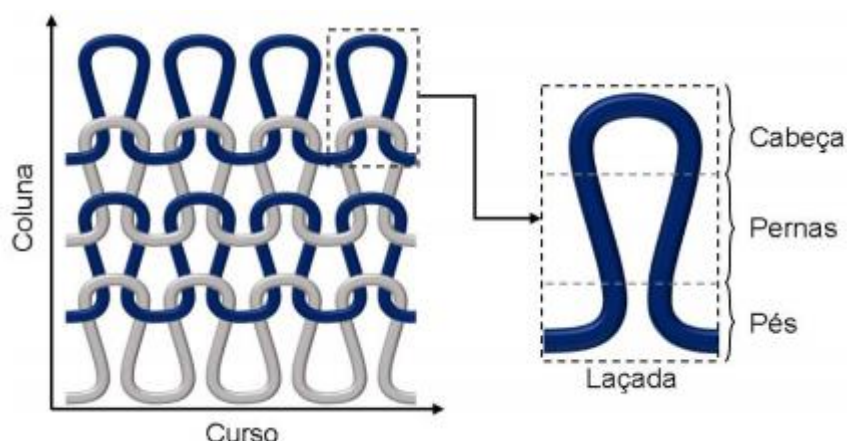
Figura 18 - Ilustração da estrutura de um tecido não tecido



Fonte: PEREIRA (2009)

O elemento fundamental do tecido de malha é a laçada. Essa estrutura é constituída por uma cabeça, duas pernas e dois pés. Esse tipo de tecido é produzido pelo entrelaçamento de fios mediante a formação de laçadas, sendo o curso a sucessão de laçadas na horizontal e a coluna a sucessão de laçadas na vertical (HOLANDA, 2016). Essa descrição pode ser observado na Figura 19:

Figura 19 – Ilustração da estrutura de um Tecido Malha



Fonte: HOLANDA (2016)

Segundo Cavalcante (2014) os tecidos são materiais planares porosos, em que o volume dos poros e a densidade das fibras determinam seu comportamento. Além disso, as propriedades das estruturas têxteis são relacionadas principalmente com a orientação dos fios e as características das fibras que os compõem,

3.2. FIBRAS TÊXTEIS

As fibras têxteis são elementos filiformes que apresentam características como flexibilidade, finura e grande comprimento em relação a dimensão transversal máxima. De modo geral, esse termo é empregado para os vários tipos de materiais, sejam eles de origem natural ou não natural, que constituem os elementos básicos para fins têxteis. (KUASNE, 2008). As fibras podem ser de origem natural, quando são extraídas da natureza na forma pronta para a aplicação têxtil, ou não naturais, quando necessitam ser submetidas a processos industriais (HOLANDA, 2016).

3.2.1. Fibras Naturais

As fibras naturais são todas as fibras que são extraídas na natureza em uma forma apta para o processo de formação dos fios, no entanto, em alguns casos é necessário primeiramente um tratamento físico. Essas estruturas são obtidas com maior facilidade, pois dependem de processos simples e podem ser obtidas como produto secundário, como na produção de lã. Os primeiros tecidos produzidos manualmente, foram fabricados mediante a utilização de fibras de

origem natural, e dependendo da fibra utilizada, os tecidos eram aplicados no cotidiano de diversas formas (GUERRA, 2016).

As fibras naturais, podem ser de origem vegetal, como o algodão e o linho, de origem animal, como a lã e a seda e de origem mineral como o amianto (HOLANDA, 2016).

3.2.2. Fibras Não Naturais

As fibras não naturais são compostas por macromoléculas sendo obtidas por meio de processos manufaturados. Elas são subdivididas em fibras artificiais e fibras sintéticas (GUERRA, 2016). As fibras não naturais começaram a ser desenvolvidas com o intuito de reproduzir e aprimorar os aspectos das fibras naturais. A partir do momento que suas aplicações foram se desenvolvendo, a produção dessas fibras tornou-se uma necessidade para a população mundial que demandava cada vez mais por vestuários confeccionados com rapidez e baixo custo (ROMERO, 1995).

As fibras artificiais são constituídas por macromoléculas de origem natural, contudo, para serem usadas no processo de formação dos fios devem ser levadas ao processamento químico (GUERRA, 2016). De acordo com Romero (1995), essas fibras são produzidas a partir da celulose, substância encontrada na pasta da madeira ou no línter de algodão. Nesse grupo de fibras estão: acetato, viscose, borracha, dentre outras.

As fibras sintéticas são formadas por macromoléculas que precisam ser sintetizadas quimicamente, pois não existem na natureza (GUERRA, 2016). Elas são produzidas por meio de resinas derivadas do petróleo. Nesse grupo de fibras, pode-se destacar a poliamida (ou náilon), polipropileno, acrílico e o poliéster. Outra categoria de fibras são os elastanos, que são responsáveis por conferir maior elasticidade aos tecidos convencionais plano ou de malha (ROMERO, 1995).

3.3. FIBRA TÊXTIL UTILIZADA NA PESQUISA

A fibra têxtil utilizada para a análise da construção dos filtros planares em substrato têxtil foi a fibra sintética de acrílico (PAC).

As fibras acrílicas, também denominadas poliacrílicas (PAC), são um tipo de fibras sintéticas. De acordo com Romero (1995) esse tipo de fibra tem seu espaço próprio na indústria têxtil e em virtude de suas características é apontada como a melhor substituta da fibra de lã.

As fibras acrílicas são produzidas a partir do polímero poliacrilonitrilo e para ser considerada uma fibra acrílica o polímero deve conter mais de 85 % de acrilonitrilo (cianeto de vinila), sendo este obtido do amoníaco, oxigênio e propilenos (KUASNE,2008).

O acrílico é um bom isolante térmico, sendo por isso, muito aplicado na confecção de artigos de inverno, tais como meias, agasalhos e cobertores. Além disso, as roupas feitas com as fibras acrílicas são leves, suaves e apresentam um bom caimento, sendo também uma fibra muito resistente a ruptura e ao calor por irradiação.

4. METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentadas todas as etapas necessárias para o estudo e desenvolvimento dos filtros planares de microfita, confeccionados sobre substrato têxtil. Desse modo, será descrito toda a metodologia empregada para a utilização do substrato flexível na construção de circuitos planares de microfita. Assim como, o processo realizado para a obtenção dos resultados teóricos e experimentais. Além disso, o processo construtivo dos filtros de microfita também será descrito.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO TECIDO

No projeto de circuitos planares de microfita as principais características analisadas com relação ao substrato são: permissividade relativa, tangente de perdas e a espessura. Para os filtros planares, essas propriedades influenciam na resposta em frequência do filtro, no dimensionamento das linhas de entrada e saída do sinal e dos ressoadores. Desse modo, antes de qualquer análise é necessário realizar a caracterização elétrica do substrato, isto é, determinar a tangente de perdas e permissividade relativa, além de determinar a espessura.

Segundo Serrano (2007) a utilização de substrato com ‘ ϵ_r ’ alto diminui as dimensões do filtro, e o ressoador é menos propenso a perdas por irradiação. Já os substratos com ‘ ϵ_r ’ baixo facilitam o processo de fabricação dos circuitos planares, pois as dimensões dos circuitos são maiores, no entanto, ocorre maior perda por irradiação.

A espessura h do substrato afeta diretamente as linhas de entrada e saída do sinal, assim, quanto maior a espessura do substrato, maior será a largura dessas linhas.

Considerando o tecido composto por fibras acrílicas utilizado nesse trabalho, os valores de tangente de perdas e permissividade relativa são:

$$\text{tg } \delta = 0,2859$$

Os valores obtidos para a permissividade real e imaginária foram, respectivamente:

$$\epsilon' = 1,4718 \text{ e } \epsilon'' = 0,4208 .$$

Assim, é possível determinar a permissividade relativa ϵ_r , sabendo que:

$$\epsilon_r = \sqrt{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2} \quad (20)$$

Substituindo os valores na equação 20, encontra-se:

$$\varepsilon_r = \sqrt{1,4718^2 + 0,4208^2} = 1,5308$$

Para determinar a espessura do tecido utilizou-se um paquímetro analógico comum, onde foi obtido $h = 1,4 \text{ mm}$.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL CONDUTOR

Para a fabricação de circuitos planares em materiais flexíveis, o material condutor deve ser escolhido de modo a manter as características maleáveis do tecido. Tendo em vista que o tipo de material condutor, a flexibilidade e a espessura podem influenciar na flexibilidade do tecido, é importante utilizar um material condutor que seja maleável e fácil de ser aplicado ao substrato têxtil.

Neste trabalho será utilizado folha metálica de cobre como material condutor. A folha de cobre possui uma espessura de 0,05 mm e condutividade $\sigma = 5,8 \times 10^7 \text{ (S.m}^{-1}\text{)}$. Apesar de não ser um material flexível, a folha de cobre não afeta a maleabilidade do tecido e pode ser fixada com facilidade no substrato têxtil (GUERRA, 2016). Para construção do filtro de microfita, a folha de cobre utilizada como ressoador, foi fixada ao substrato têxtil utilizando cola a base de Cianoacrilato.

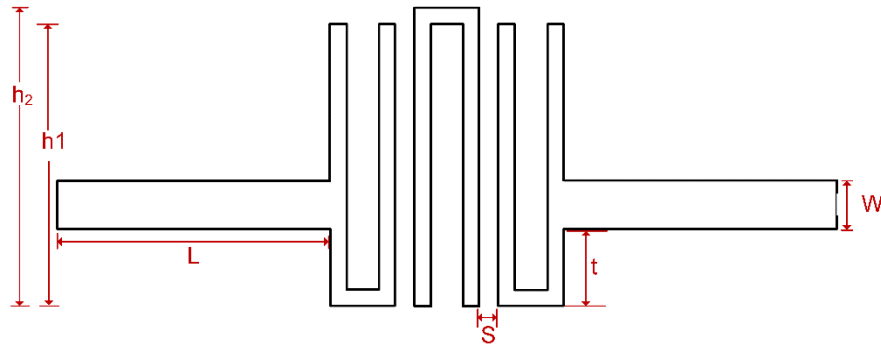
4.3. SÍNTESE DOS FILTROS PLANARES

Os filtros construídos, foram baseados inicialmente nos filtros apresentados em Minervino (2013) e Hong; Lancaster (2001). Inicialmente os filtros passa-faixa e rejeita-faixa foram simulados com algumas dimensões semelhantes as apresentadas pelos autores supracitados. Para efeito de análise da variação do substrato no circuito planar, os filtros com as mesmas dimensões foram simulados considerando as características tanto do substrato de FR4 quanto do substrato têxtil a base de fibras acrílicas. Posteriormente, iniciou-se o projeto dos filtros que foram construídos no substrato têxtil.

4.3.1. Filtro Passa-Banda

O filtro passa-banda proposto é ilustrado na Figura 20. Consiste em um filtro *Hairpin*. Os filtros *Hairpin* recebem esse nome pelo formato de ‘U’, estes são amplamente utilizados, em decorrência de sua característica passa-banda. (BENAR, et al., 2016).

Figura 20 – Protótipo inicial do Filtro Passa-Faixa



Fonte: Autoria Própria (2018)

Para iniciar a análise do filtro, este foi inicialmente simulado com as dimensões baseadas em Hong; Lancaster (2001). Da estrutura apresentada pelo autor mencionado, utilizou-se as dimensões dos ressoadores, isto é a largura e o comprimento de cada ‘U’, assim como a localização das linhas de entrada e saída do sinal, representada na imagem acima pelo parâmetro ‘t’. A escolha do espaçamento ‘S’ entre os ressoadores, foi baseada em uma análise efetuada por Hassan (2015), que apresenta uma tabela com valores dos espaçamentos e o efeito desses valores para a resposta em frequência dos filtros.

Para dimensionar a largura e o comprimento das linhas de acoplamento de entrada e saída do sinal, foram utilizadas as equações (1) – (3) apresentadas em Silva Neto (2017). A largura da linha foi calculada mediante a seguinte equação:

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \left\{ \frac{\left[\exp\left(\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 1}}{42,4}\right) - 1 \right] \left(7 + \frac{4}{\epsilon_r}\right) + \left(1 + \frac{1}{\epsilon_r}\right)}{11} + \frac{1}{0,81} \right\}^{\frac{1}{2}}}{\exp\left(\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 1}}{42,4}\right) - 1} \quad (21)$$

Para o cálculo do comprimento das linhas de transmissão foram realizadas as seguintes análises:

Para a linha de microfita o comprimento de onda é calculado pela seguinte equação:

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (22)$$

Esses parâmetros podem ser encontradas a partir das expressões expostas a seguir:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (23)$$

Em que ‘c’ corresponde a velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) e ‘f’ a frequência de operação. Para valores mais precisos para a permissividade efetiva pode-se utilizar as equações abaixo:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} + 0,04 \left(1 - \frac{W}{h}\right)^2 \text{ para } \frac{W}{h} < 1 \quad (23)$$

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \text{ para } \frac{W}{h} > 1 \quad (24)$$

Após a simulação do filtro em FR-4, realizou-se a simulação com o substrato têxtil. Nesse estágio inicial, não se levou em consideração as características do substrato têxtil para dimensionar a estrutura do filtro. Assim, nenhuma dimensão foi variada, com o intuito de verificar o efeito da variação do substrato para a resposta em frequência do filtro.

Posteriormente, se deu início ao projeto da estrutura do filtro, utilizando as características elétricas do tecido. A largura das linhas de entrada e saída do sinal, foram projetadas considerando, no cálculo, a permissividade relativa do tecido e a impedância característica Z_0 igual a 50Ω . A largura dos ressoadores foram aumentadas em proporção a largura W das linhas de entrada e saída do sinal. O espaçamento foi mantido.

Para determinar o valor do comprimento de cada U, foram realizados alguns testes no software de simulação *HFSS*. Após algumas simulações, verificou-se o que ocorria com a frequência de ressonância a cada variação do comprimento dos ressoadores. A cada simulação, anotou-se os valores para os comprimento h_1 e h_2 dos ressoadores, a frequência de ressonância e a faixa de frequência onde se iniciava e terminava a banda de transmissão. Desse modo, foi possível montar um banco de dados para utilizar o ambiente computacional MATLAB®. O objetivo da utilização dessa ferramenta computacional, foi o de encontrar os valores precisos para os comprimentos h_1 e h_2 do ressoadores, para uma reposta com frequência central em 2,45 GHz.

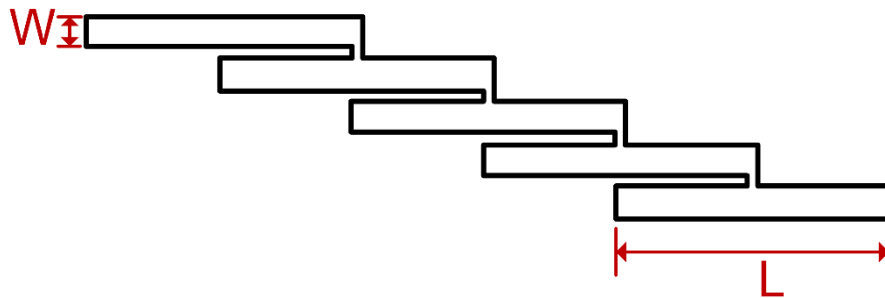
No MATLAB® utilizou-se a ferramenta *Neural Network Toolbox* (NNTOOL), que consiste em um ambiente para treinamento de redes neurais artificiais. Com as anotações

realizadas a cada simulação, foi realizado o treinamento da rede neural. Feito isso, solicitou-se a rede valores para os comprimentos dos ressoadores, para uma frequência de ressonância de 2,45 GHz.

4.3.2. Filtro Rejeita-Banda

O processo de síntese do filtro rejeita-banda foi realizado mediante a utilização das equações empregadas para o filtro passa-banda. A ilustração do protótipo desse filtro é exibida na Figura 21:

Figura 21- Protótipo inicial do Filtro Rejeita-Faixa



Fonte: Autoria Própria (2018)

Esse filtro foi baseado no filtro desenvolvido em Minervino (2013). Consiste em um filtro com linhas de meio comprimento de onda acopladas. Analogamente ao filtro passa-banda, após a simulação do filtro em FR4, as mesmas dimensões foram utilizadas para realizar a simulação com o substrato têxtil, com a finalidade de analisar o efeito da variação do substrato na resposta em frequência do filtro.

Em seguida, o filtro foi projetado para aplicação em banda WiMax (3,5 GHz), considerando as características elétricas do substrato têxtil e o casamento de impedância de 50 Ω . A largura das linhas foram calculadas analiticamente a partir da equação (21). O espaçamento entre as linhas foi mantido igual ao apresentado em Minervino (2013), e o comprimento 'L' foi dimensionado, fazendo-se:

$$L = \frac{\lambda_m}{2} \quad (25)$$

4.4. SIMULAÇÕES

Para analisar o efeito da aplicabilidade do tecido como substrato, o *software Ansoft HFSS*® foi utilizado para simular a resposta em frequência dos filtros planares. Objetivando analisar a variação das respostas em frequência e projetar os filtros para operarem nas frequências desejadas, algumas simulações foram realizadas para dimensionar os filtros.

A partir das simulações, são determinadas informações como a frequência de ressonância, tipo do filtro, largura de banda, perda de retorno e perda de inserção. Mediante essas informações algumas alterações no projeto são realizadas até se obter as respostas satisfatórias.

4.5. FABRICAÇÃO E EXPERIMENTOS

Após o processo de simulação e obtenção da resposta em frequência esperada, deu-se início ao processo de construção dos filtros. Para fazer o *design* dos ressoadores utilizou-se adesivos que foram dispostos na folha de cobre para recorta-la corretamente. O passo seguinte consiste em fixar a folha metálica sobre o substrato têxtil. Para isso, foi utilizado cola a base de Cianoacrilato.

Posteriormente, foi possível realizar os experimentos com os filtros. Para isso, foi utilizado o analisador de rede vetorial ou VNA, um instrumento laboratorial que realiza medições de micro-ondas. O VNA realiza medições precisas em uma faixa de frequência de 10 MHz a 110 GHz. A uma determinada frequência, um sinal é enviado da porta 1 do equipamento para o dispositivo a ser testado, uma parte desse sinal incidente pode ser refletido de volta para a porta 1 ou é irradiado, e a outra parte é transmitida para a porta 2 do equipamento. O VNA mede a razão entre o sinal refletido e o sinal incidente (S_{11}), assim como a relação entre o sinal transmitido e o sinal incidente (S_{21}). Realizando assim, as medições dos parâmetros de reflexão e transmissão do dispositivo testado (WENTWORTH, 2009).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa parte do trabalho serão mostrados os resultados obtidos, as simulações, as dimensões dos filtros passa-banda e rejeita-banda, bem como os resultados medidos no VNA. Os filtros planares simulados no HFSS foram construídos sobre substrato têxtil constituídos de fibras acrílicas (PAC) para posteriormente serem medidos no VNA.

5.1. FILTRO PASSA-BANDA

A seguir será apresentado os parâmetros encontrados considerando-se o filtro em FR4. Optou-se por iniciar as análises com o substrato de FR4, pois este é frequentemente utilizado na construção de circuitos planares, e também foi empregado pelos autores que serviram de base para o projeto dos filtros construídos nessa pesquisa. As características elétricas do FR4 são:

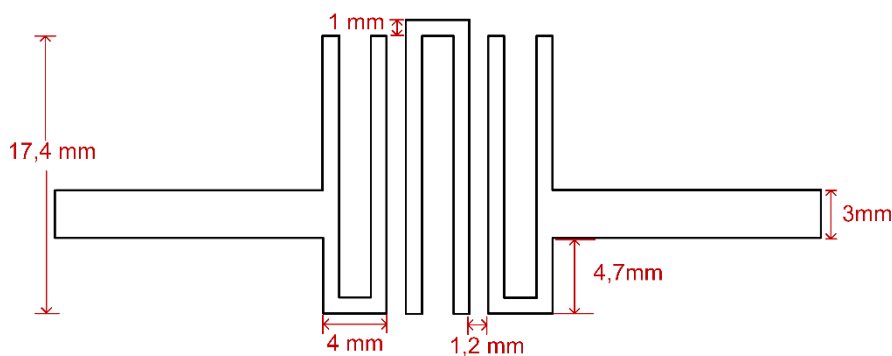
Tabela 1- Características Elétricas do substrato FR4-Epoxi

Parâmetros do Substrato	Valores
Permissividade Relativa (ϵ_r)	4,4
Tangente de Perdas ($\text{tg}\delta$)	0,02
Espessura (h)	1,57 mm

Fonte: Autoria Própria (2018)

Considerando esse valores dimensionou-se o filtro passa-banda, como exibido na Figura 22:

Figura 22-Dimensões do Filtro em FR4



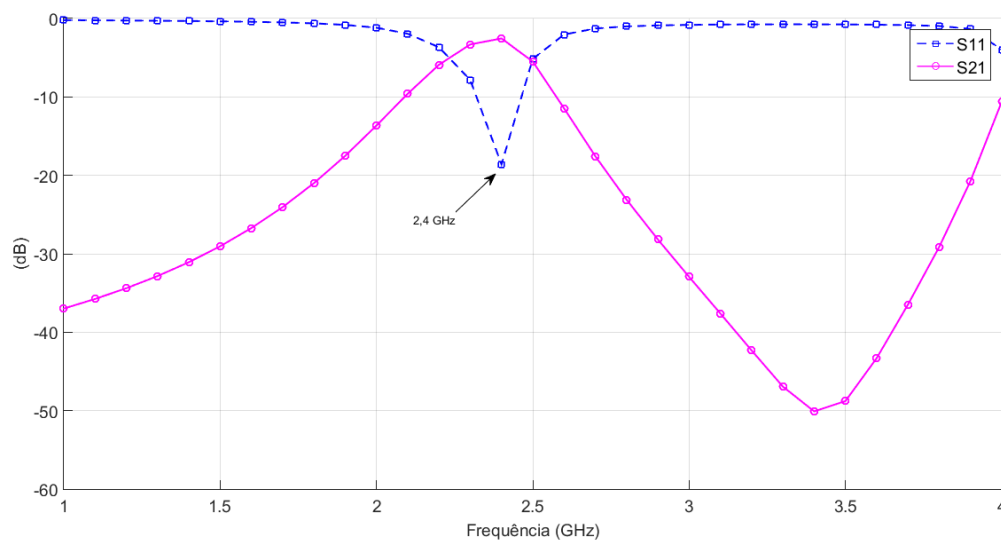
Fonte: Autoria Própria (2018)

A largura das linhas de entrada e saída do sinal foram encontradas através da equação (21), para uma impedância característica de 50Ω . O comprimento foi determinado fazendo-se:

$$L = \frac{\lambda_m}{4} \quad (26)$$

No software *Ansoft HFSS* foi realizado a simulação desse protótipo, obtendo a resposta apresentada na figura 23:

Figura 23 – Resultado da Simulação no HFSS do Filtro em FR4

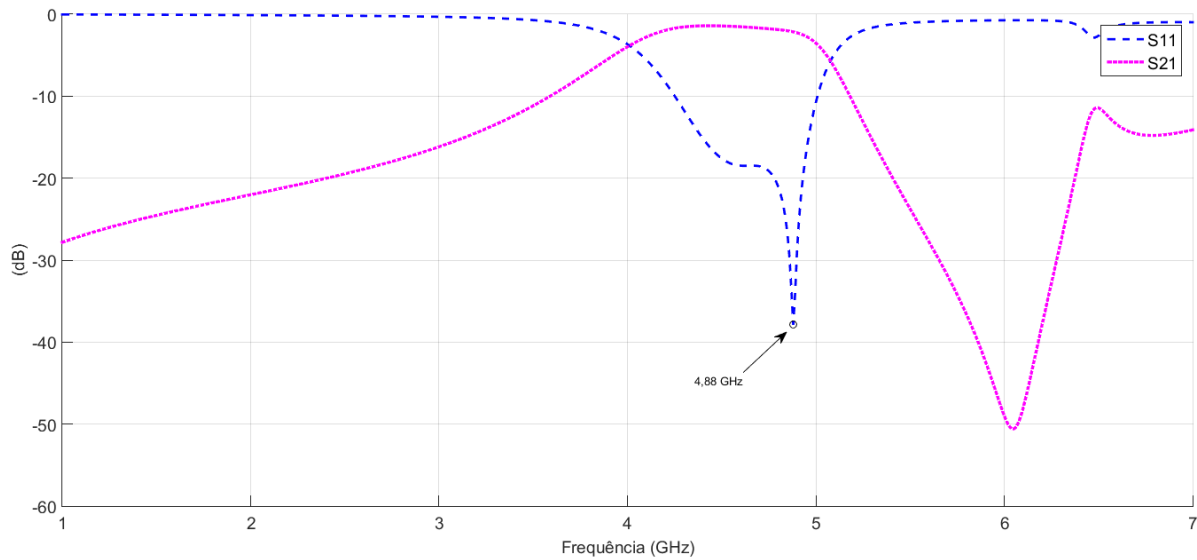


Fonte: Autoria Própria (2018)

A simulação apresentou uma frequência de ressonância em 2,4 GHz. A banda passante localiza-se na faixa de 2,23 GHz a 2,5 GHz, com uma perda de retorno de -18,6 dB, para a frequência de ressonância e uma ondulação na banda passante de 5,5 dB.

Para analisar a variação do substrato na resposta em frequência do filtro, as mesmas dimensões foram empregadas na simulação do filtro em substrato têxtil. Obtendo a resposta mostrada na Figura 24:

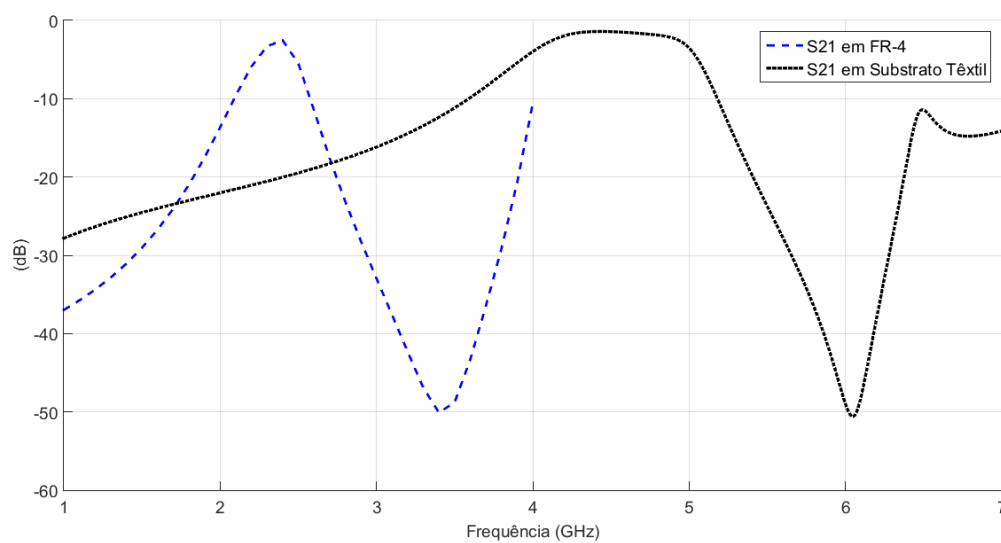
Figura 24 – Resposta do Filtro Passa-Banda no Tecido Acrílico



Fonte: Autoria Própria (2018)

Como é possível observar ocorreu um deslocamento considerável da frequência de corte do filtro. Um dos motivos que acarretou tal variação foi a tangente de perdas. Para o substrato têxtil a tangente de perdas possui um valor de 0,2859, esse valor é consideravelmente elevado se comparado com a tangente de perdas do FR4 que corresponde a 0,02. As curvas S_{21} são exibidas na Figura 25 para efeito de comparação.

Figura 25 – Parâmetros de Transmissão para o Filtro Passa-Faixa em FR-4 e em Substrato Têxtil

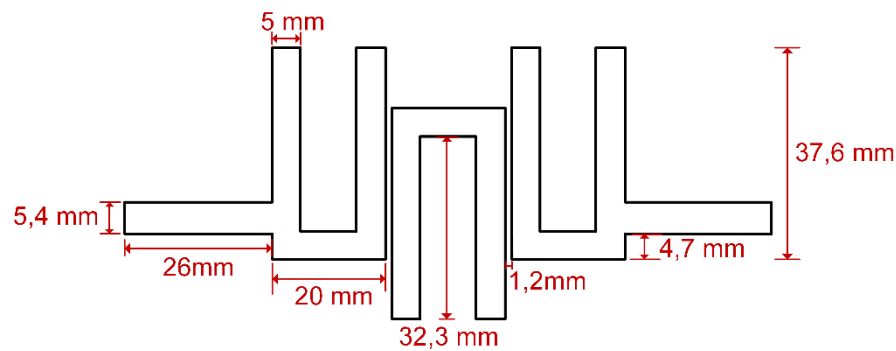


Fonte: Autoria Própria (2018)

Para alcançar a operação em frequência desejada para o filtro, objetivando a aplicação na banda de ISM, 2,45 GHz, foi necessário realizar uma otimização. Para isso, as dimensões das linhas de entrada e saída, foram recalculadas utilizando as características elétricas do substrato têxtil. Posteriormente, as dimensões dos ressoadores foram alteradas. A largura dos ressoadores foram ajustadas proporcionalmente a largura das linhas de entrada e saída do sinal.

Para determinar o comprimento dos ressoadores, utilizou a rede neural artificial do MATLAB®. Algumas simulações foram realizadas, variando os valores dos comprimentos de cada ‘U’ para que fosse possível realizar o treinamento da rede. Feito isso, solicitou a rede os comprimentos adequados dos ressoadores, para alcançar a frequência de corte em 2,45 GHz. Assim, as dimensões dos ressoadores são:

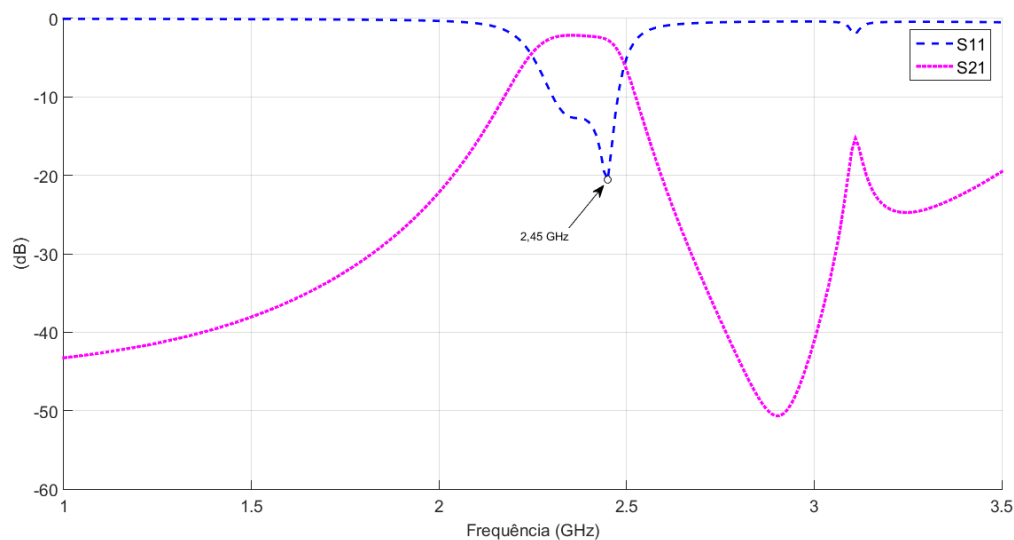
Figura 26 – Dimensões do Filtro Otimizado com RNA.



Fonte: Autoria Própria (2018)

O resultado simulado é mostrado na Figura 27:

Figura 27 – Resultado da simulação do Filtro Passa-Banda em Acrílico.



Fonte: Autoria Própria (2018)

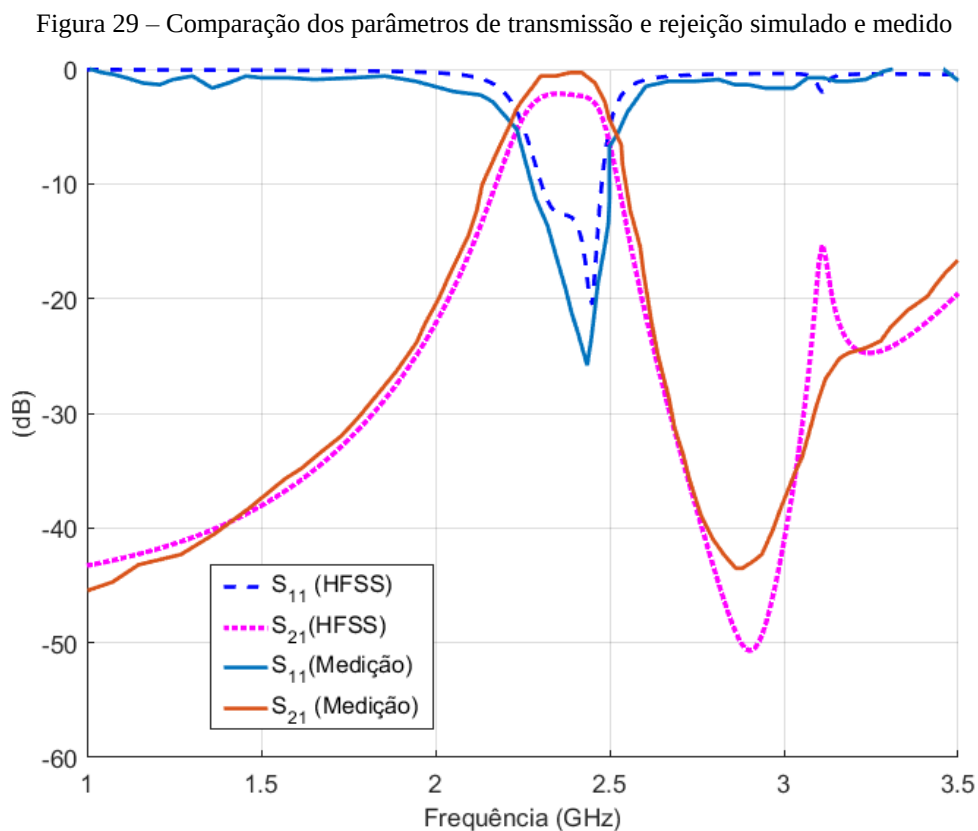
A resposta simulada foi satisfatória, a ressonância ocorreu na frequência de 2,45 GHz, com uma perda de retorno de -20,53 dB. A ondulação na banda passante foi de 2,5 dB, a faixa de transmissão localiza-se entre 2,25 GHz a 2,5 GHz. Obtendo-se a resposta simulada satisfatória, o filtro planar passa-banda foi construído com as dimensões ilustradas na Figura 26.

Figura 28 – Filtro Planar Construído



Fonte: Autoria Própria (2018)

Para efeitos de caracterização experimental, um protótipo para esse filtro foi fabricado, conforme pode ser visto na Figura 28. O filtro foi caracterizado experimentalmente, a Figura 29 ilustra os resultados obtidos.



De acordo com as curvas anteriores, o filtro apresentou uma frequência central medida de 2,44 GHz com uma perda de retorno de -25,8dB, para a frequência de ressonância. A largura de banda foi de aproximadamente 320MHz, com uma perda por inserção máxima de 1dB, aproximadamente. Percebe-se uma forte rejeição nas frequências de 1,5GHz e 2,93GHz. A Tabela 2 compara os resultados simulados e medidos para esse filtro.

Tabela 2 – Comparativo Entre Os Resultados Medidos E Simulados Para O Filtro Passa-Banda

Parâmetro	HFSS	Medição
Frequência de Ressonância (GHz)	2,45	2,44
Banda Passante (MHz)	250	320
S ₂₁ (dB)	2,5	1
S ₁₁ (dB)	20,53	25,8
Frequência de Rejeição Inferior (GHz)	1,01	1,5
Frequência de Rejeição Superior (GHz)	2,9	2,93

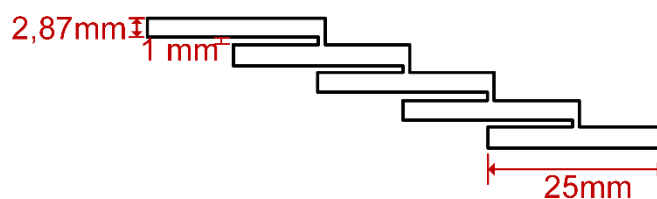
Fonte: Autoria Própria (2018)

De acordo com os dados apresentados na tabela anterior, pode-se afirmar que foi verificada uma excelente correspondência entre a análise teórica realizada pela simulação em HFSS e os resultados da análise experimental. Desta forma, pode concluir que a síntese proposta para o filtro descrito neste trabalho foi validada.

5.2. FILTRO REJEITA-FAIXA

O procedimento análogo foi realizado para o filtro rejeita-faixa. A análise se iniciou com a simulação do filtro para o substrato de FR4. O dimensionamento é semelhante ao apresentado em Minervino (2013).

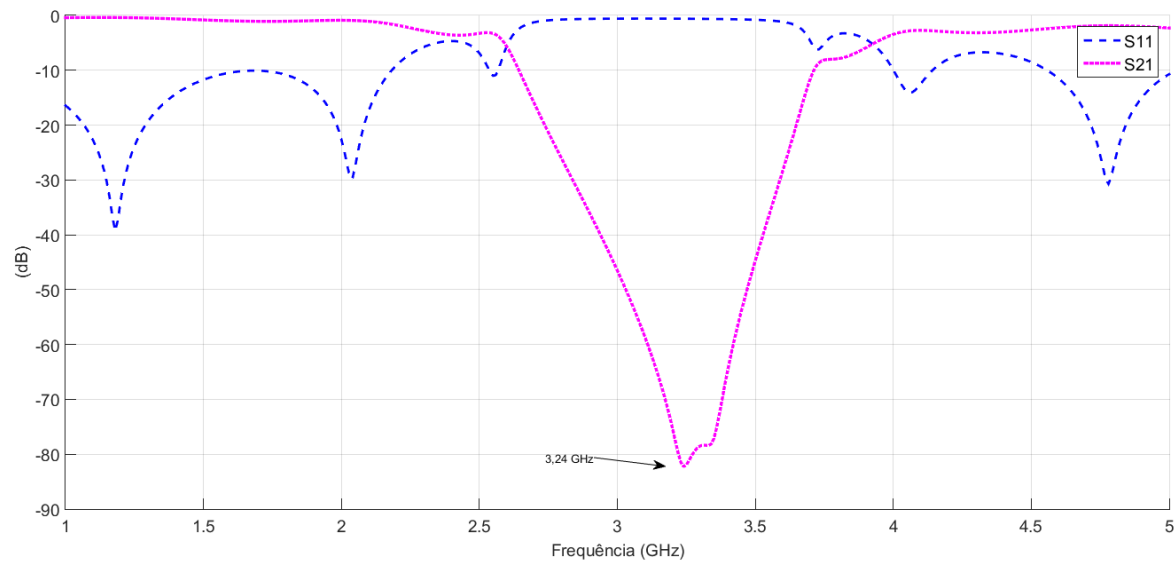
Figura 30 – Dimensões do Filtro Rejeita – Faixa em FR4.



Fonte: Autoria Própria (2018)

O resultado da simulação desse protótipo é exibido na Figura 31:

Figura 31 - Resultado da Simulação no HFSS do Filtro em FR4

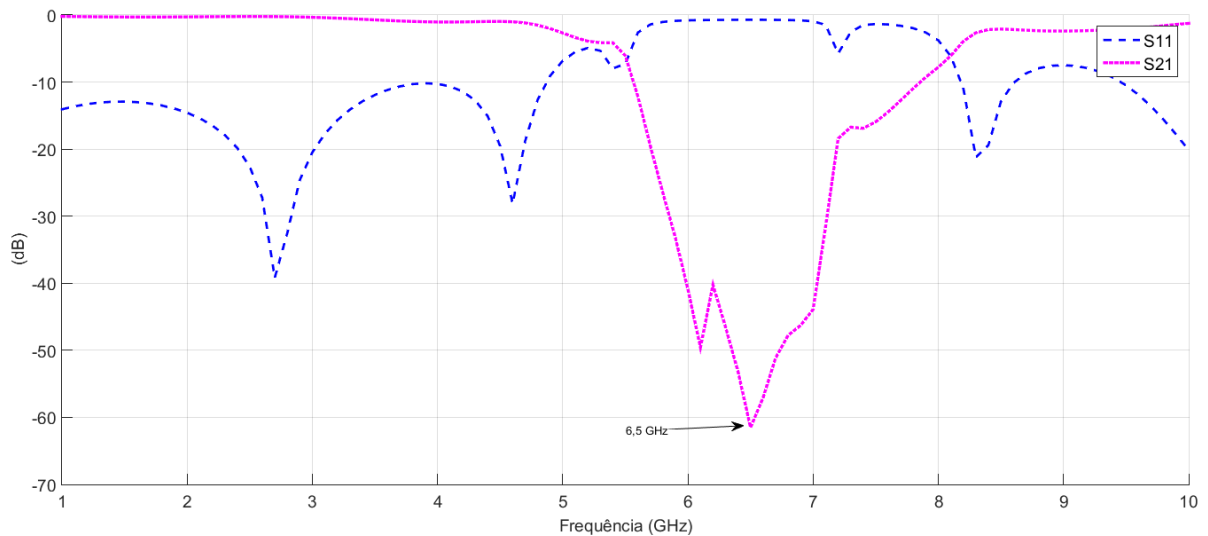


Fonte: Autoria Própria (2018)

Observando as curvas exibidas acima, observa-se que a frequência de corte do filtro é de aproximadamente 3,24 GHz. Atenuando completamente a faixa de frequência localizada na banda de rejeição do filtro.

Similarmente a análise do filtro passa-faixa, as dimensões foram mantidas para verificar o efeito da variação do substrato na resposta em frequência do filtro planar. Obtendo o resultado ilustrado na Figura 32:

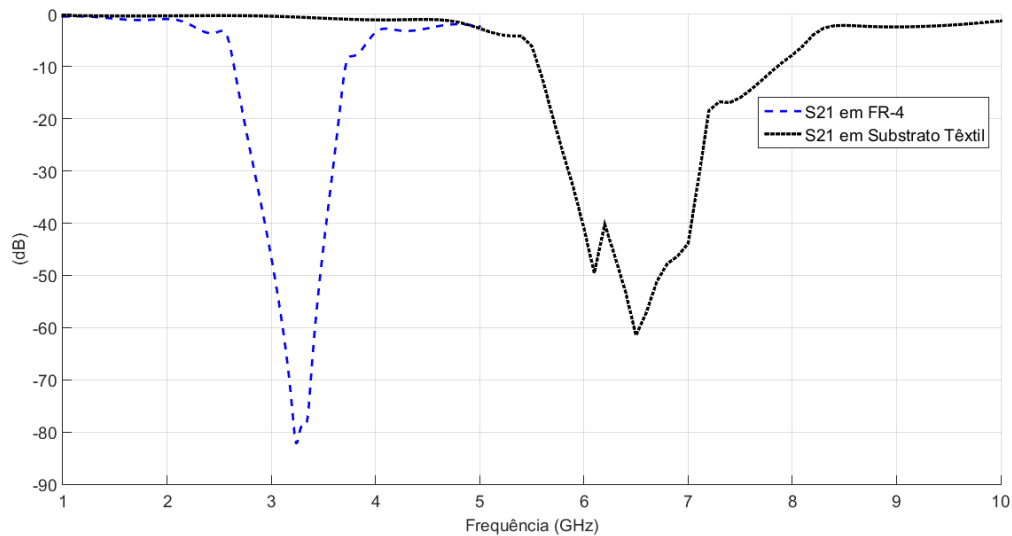
Figura 32 - Resposta do Filtro Rejeita-Banda no Tecido de Acrílico



Fonte: Autoria Própria (2018)

Analogamente ao filtro passa-banda, ao realizar a simulação com o substrato têxtil, ocorreu uma variação considerável na frequência de corte do filtro. Tendo em vista, que a frequência de ressonância do filtro modificou para 6,5 GHz. A Figura 33 apresenta as curvas S_{21} para simulação em cada um dos substratos:

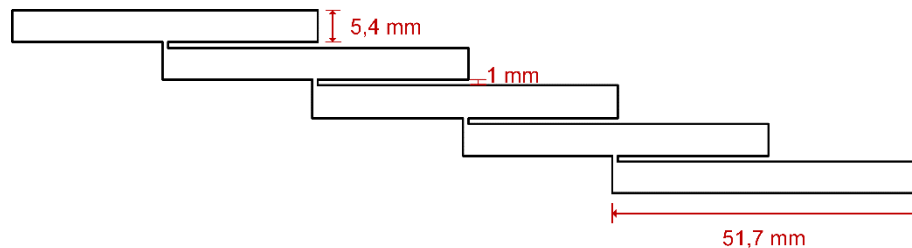
Figura 33- Parâmetros de Transmissão para o Filtro Rejeita-Faixa em FR-4 e em Substrato Têxtil



Fonte: Autoria Própria (2018).

Posteriormente deu início ao projeto do filtro para frequência de corte em 3,5 GHz. Para tanto, a equação 13 foi utilizada para dimensionar a largura das linhas. E o comprimento foi determinado, fazendo-se $L = \frac{\lambda_m}{2}$.

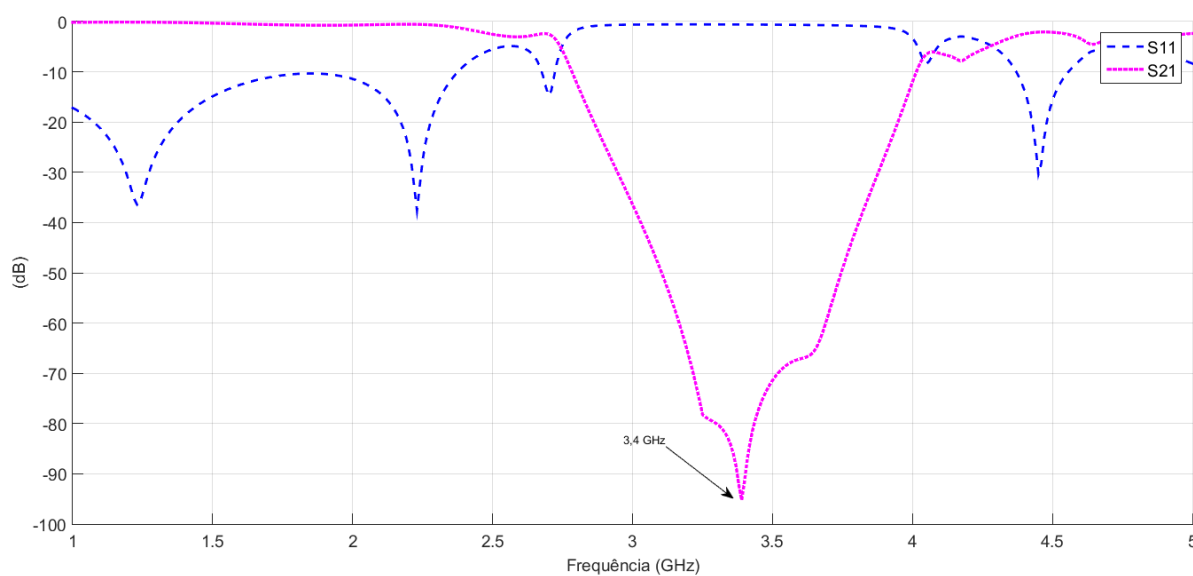
Figura 34 – Dimensões do Filtro Rejeita – Faixa Projetado.



Fonte: Autoria Própria (2018)

Este filtro foi simulado no *HFSS*, e as curvas de transmissão e rejeição são mostradas na Figura 35:

Figura 35 - Resultado da simulação do Filtro Rejeita-Banda em Tecido Acrílico



Fonte: Autoria Própria (2018)

Analisando as curvas exibidas, é possível verificar que a simulação apresentou um resultado satisfatório, a frequência de corte foi aproximadamente 3,4 GHz. Mesmo com a alta tangente de perdas do substrato têxtil, foi possível projetar um filtro com uma boa rejeição em uma faixa localizada entre a frequência de operação desejada. O protótipo construído é visto na Figura 36.

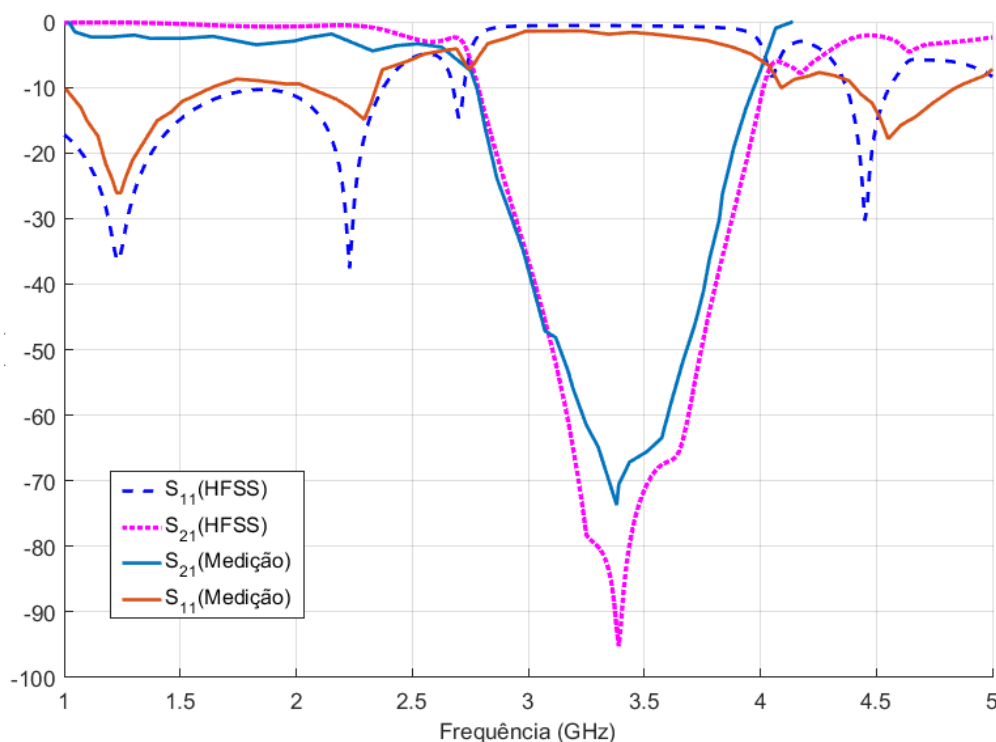
Figura 36 – Protótipo Do Filtro Rejeita – Banda Construído Sobre O Substrato Têxtil



Fonte: Autoria Própria (2018)

Os resultados relacionados à caracterização numérica experimental podem ser identificados na Figura 37.

Figura 37- Resultados dos parâmetros de transmissão e rejeição simulado e medido



Fonte: Autoria Própria (2018)

De acordo com os resultados apresentados, percebe-se uma excelente correspondência para a banda de rejeição medida e simulada, como fica evidenciado nas curvas da Figura 37. O filtro apresentou uma frequência de rejeição medida igual a 3,338GHz, com um nível de rejeição de -73,42dB, com uma banda de rejeição de 1,16GHz. Uma boa concordância com os resultados simulados foi verificada. A Tabela 3 compara os resultados simulados e medidos para esse filtro.

Tabela 3- Comparativo Entre Os Resultados Medidos E Simulados Para O Filtro Rejeita-Faixa

Parâmetro	HFSS	Medição
Frequência de Ressonância (GHz)	3,4	3,338
Banda de Rejeição (GHz)	1,3	1,16
S ₂₁ (dB)	95,21	73,42
S ₁₁ (dB)	0,6092	1

Fonte: Autoria Própria (2018)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho se propôs a realizar uma análise sobre a utilização de matérias têxteis como substrato. Para isso, foram desenvolvidos dois filtros planares de microfitas, um com características passa-banda e outro rejeita-banda. O material têxtil empregado como substrato, é constituído por fibras de acrílico (PAC). Os parâmetros de transmissão e rejeição dos filtros foram analisados, sendo possível verificar que mesmo o tecido apresentando alta tangente de perdas, este foi empregado para o desenvolvimento dos dispositivos, apresentando respostas em frequência satisfatórias.

O processo inicial da pesquisa, consistiu em analisar o efeito do substrato na resposta em frequência de cada filtro. Toda a análise foi realizada através de simulações no *software Ansoft HFSS*. Nas simulações foram observados, os parâmetros de transmissão, reflexão, perda na banda passante e ganho. Através dessas análises, foi possível observar que a principal variação que o substrato têxtil provocou, foi o deslocamento da frequência de ressonância, este fato, foi explicado em virtude da alta tangente de perdas do tecido.

O filtro passa-banda foi projetado para aplicações em banda ISM (2,45 GHz). O processo de dimensionamento desse filtro, foi realizado analiticamente e com o auxílio da ferramenta NNTOLL do MATLAB®. O filtro rejeita-banda foi sintetizado unicamente através de cálculos analíticos, utilizando as equações de linhas de microfita. Sendo este, projetado para aplicações em WiMax (3,5 GHz).

Os dispositivos planares foram projetados para aplicações em sistemas *wireless*, haja visto, a importância dos filtros planares para essas aplicações que requerem seletividade na frequência. A utilização de materiais maleáveis na construção desses dispositivos, objetiva a inovação nos sistemas de comunicação, visando aplicações militares, na área biomédica e diversas outras aplicações que os substratos rígidos são inviáveis.

A caracterização experimental dos protótipos de filtros desenvolvidos neste trabalho foi realizada para fins de comparação. Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que uma boa concordância entre simulações e experimentos foi verificada. Desta forma, validando as suposições teóricas apresentadas.

Como perspectivas futuras de continuidade deste trabalho, propõem-se o desenvolvimento de filtros planares utilizando outros tecidos como substrato, ou até mesmo, outros materiais flexíveis, tais como cerâmicas, compósitos ou polímeros. Além disso, outras concepções seriam desenvolvimento de outras geometrias de filtros, assim como, o

desenvolvimento de outros dispositivos planares, tais como antenas de microfita e superfície seletiva de frequências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Célio Ramos. **Um Novo Filtro de Microondas com Dupla Banda Passante Utilizando Ressonadores Miniaturizados**. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Tecnologia, Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília/ Df, 2007.

ARAÚJO, Tiago Costa de. **Estudos e Projetos de Filtros Interdigital em Microfita para aplicação Prática ao Transponder so Satélite ITASAT**. 2012. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

BENAR, Cem et al. Changing passband on microstrip hairpin band-pass filter. **2016 Ieee/aces International Conference On Wireless Information Technology And Systems (icwits) And Applied Computational Electromagnetics (aces)**, [s.l.], mar. 2016. IEEE.

CAVALCANTE, Gustavo Araújo. **Desenvolvimento de Circuitos Planares Sobre Substratos Têxteis**. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

DANTAS, Maria José Pereira. **Metodologia de Síntese de Filtros de Microondas de Topologias Arbitrárias Utilizando Algoritmo Evolucionário Híbrido (memético) Associado a Conhecimento Especialista**. 2008. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Tecnologia, Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília/ Df, 2008.

GUERRA, Juan Rafael Filguiera. **Projeto de Antena de Microfita Flexível Utilizando de Tecido Malha a Base de Fibras Naturais e Sintéticas**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, 2016.

HASSAN, Hamid Ali. **Design & Size Reduction Analysis of Micro Strip Hairpin Band Pass Filters**. 2015. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Master's Thesis In Electronics, University Of Gävle. Faculty Of Engineering And Sustainable Development ., Gävle, 2015.

HOLANDA, Samanta Mesquita de. **Estudo e Desenvolvimento de Antenas de Microfita Utilizando Tecido de Malha a Base de Fibras Têxteis Compostas**. 2016. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, 2016.

HONG, Jia-sheng; LANCASTER, M. J.. **Microstrip Filters for RF/Microwave Applications**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

MINERVINO, Diego Ramalho. **Desenvolvimento de estruturas integradas de filtros e antenas para aplicações em sistemas de comunicações sem fio**. 2013. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

MORO, Riccardo et al. **Textile Microwave Components in Substrate Integrated Waveguide Technology**. Ieee Transactions On Microwave Theory And Techniques, [s.l.], v. 63, n. 2, p.422-432, fev. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

POZAR, David M.. Microwave Filters. In: POZAR, David M.. **Microwave Engineering**. 4. ed. United States Of America: Johnwiley & Sons, Inc., 2012. Cap. 8. p. 380-443.

ROMANI, Ivan Ney Alvizuri. **Síntese de Filtros de Microondas Compactos com Respostas Elípticas e Pseudo-Elípticas Utilizando a Variável Transformada Z**. 2006. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Tecnologia, Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília/ Df, 2006.

ROMERO, L. L. et al. **Fibras artificiais e sintéticas**. Rio de Janeiro: BNDS. Relatório setorial Junho de, v. 1995, 1995.

SADIKU, Matthew N.O.. Linhas de Transmissão. In: SADIKU, Matthew N.O. **Elementos do Eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. Cap. 11. p. 429-472.

SERRANO, Ariana M.c. Lacorte Caniato. **Projeto de Filtros de Microondas Passa-Faixa Planares Utilizando Ressonadores Patch Dual-Mode**. 2007. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, São Paulo, 2007.

SILVA NETO, Valdemir Praxedes da. **Caracterização de Circuitos Planares de Microondas pelo Método Iterativo das Ondas**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SILVA NETO, Valdemir Praxedes da. **Linhas de Transmissão e Ondas**: Ufersa: Imagem, 2017. 17 slides, color.

SOUZA PEREIRA, Gislaíne de. **Apostila de Introdução à Tecnologia Têxtil. Módulo II**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina: Araranguá, 2009.

SUSILA, M; RAO, T Rama; PUSHPALATHA, M. Integrated bandpass-filter with planar UWB antenna for wireless communications. **2017 Ieee International Conference On Signal Processing, Informatics, Communication And Energy Systems (spices)**, [s.l.], p.1-4, ago. 2017. IEEE.

WENTWORTH, Stuart M.. **Eletromagnetismo Aplicado**: Abordagem Antecipada das Linhas de Transmissão. Porto Alegre: Bookman, 2009. 672 p. Tradução de Fernando Henrique Silveira.

ZULUAGA, Sara Maria Yepes. **Desenvolvimento de Filtro Passa-Faixa Banda Larga com Zeros de Transmissão para Sistemas de Comunicação Ultra-Wideband (UWB)**. 2007. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Tecnologia, Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília/ Df, 2007.